الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement
Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 20 Août 1955 - SKIKDA -
Faculté des Sciences
Dpartement D' Agronomie
Réf : / D S AGRO/2026

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
جامعة 20 أوت 1955 - سكيكدة
كلية العلوم
قسم علوم الفلاحة
رقم : / ق ع ف / 2026

Skikda le : 01/ 07/ 2026

Autorisation de Dépôt de Mémoire de Master

Je soussigné(e) : **SOUILAH Nabila** Président(e) de Jury

Certifie que L'étudiant(e) : **CHARIM Ahlem**

Spécialité : **Amélioration des plantes**

Intitulé : Comparaison de la réponse du blé dur (*Triticum durum* L.) à l'application d'un biofertilisant amélioré .

A apporté les corrections relatives à son travail de mémoire.

Directeur de mémoire	Président(e) de Jury

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université 20 Août 1955 Skikda

Faculté des Sciences

Département des Sciences Agronomiques

Filière : Sciences Agronomiques

Option : Amélioration des plantes

Mémoire de fin d'études :

En vue de l'obtention du diplôme de Master II en Amélioration des plantes

Thème :

Comparaison de la réponse du blé dur (*Triticum durum* L.) à l'application d'un biofertilisant amélioré

Présenté le :

- **Charim Ahlem**
- **Boudemagh Chaima**
- **Bounemra Maissa**

Membre de Jury :

Mme : Souilah Nabila	MCA	**Présidente**	Université du 20 Août 1955 – Skikda
Mme : Bounouara Zohra	MCA	**Examinatrice**	Université du 20 Août 1955 – Skikda
Mme :Larit Sabah	MCA	**Promotrice**	Université du 20 Août 1955 – Skikda

Année Universitaire : 2025 – 2026


بسم الله الرحمن الرحيم

REMERCIEMENT

Avant tout, nous remercions Dieu le Tout-Puissant de nous avoir donné la force, la patience et le courage nécessaires pour mener ce travail à terme.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à notre promotrice, MADAME Larit Sabah, pour son encadrement, sa disponibilité, ses précieux conseils ainsi que son accompagnement tout au long de la réalisation de ce mémoire. Sa patience, son sérieux et son soutien nous ont été d'une GRANDE aide merci beaucoup.

Nous adressons nos sincères remerciements à MADAME SOUILAH Nabila, pour l'honneur qu'elle nous fait en acceptant de présider ce jury et pour l'intérêt qu'elle à porté à notre travail et pour son aide.

Nous exprimons également notre profonde reconnaissance à Madame BOUNPUARA Zohra pour avoir accepté d'examiner ce mémoire et pour les remarques et suggestions constructives qu'il nous a apportées.

Enfin, nous tenons à remercier chaleureusement tout le corps enseignant et technique du Département d'Agronomie de l'Université de Skikda, particulièrement le personnel des laboratoires et de la serre expérimentale pour leur aide précieuse lors des phases de traitement et de mesures.

Nous espérons que ce travail sera à la hauteur des attentes

DÉDICACE

En hommage à mon cher père, que Dieu lui accorde Sa miséricorde et l'accueille dans Son vaste paradis.

À toi, papa, qui as été mon soutien, ma force et ma première source d'amour, je dédie ce travail avec tout mon cœur. Ton absence est profonde, mais ta présence demeure en moi à travers tes valeurs et tout ce que tu m'as transmis. Que ce travail soit une humble preuve de mon amour éternel pour toi.

À ma très chère mère,

Merci pour ton amour inconditionnel, ton soutien constant et ta présence à mes côtés dans chaque étape de ma vie. Tu es ma force, mon refuge et ma plus grande motivation. Ce travail est aussi le tien.

À ma petite sœur Nour El Houda,

Merci pour ta douceur, ta joie et ton soutien au quotidien. Ta présence illumine mes journées et m'encourage à avancer.

Je vous dédie ce travail avec tout mon amour et ma reconnaissance infinie.

Ahlem Ch

DÉDICACE

Du fond du cœur, je dédie le fruit de ce modeste travail à toutes les personnes qui ont contribué à mon soutien et m'ont accompagnée tout au long de mon parcours universitaire.

À ma chère mère et à mon cher père, qui ont semé en moi l'espoir et le goût de l'effort, et qui m'ont entourée de leur amour et de leurs prières sincères, étant pour moi un véritable soutien à chaque étape de ma vie.

À mes chers frères : Djalal, Taha, Oussama et Souhaib, ainsi qu'à mes chères sœurs : Wiam et Dalal. Merci pour votre amour sincère, vos encouragements constants et votre présence à mes côtés dans toutes les circonstances. Vous avez été pour moi un soutien précieux et une véritable force.

À tous les membres de ma famille, petits et grands, qui m'ont entourée d'affection et de bienveillance. À mes chers amis et collègues, ainsi qu'à toutes les personnes qui m'ont soutenue par un mot gentil, une prière sincère ou un geste noble.

À vous tous, je dédie ce travail en signe de fidélité et de reconnaissance, en espérant qu'il soit une source de fierté et de bonheur.

Chaima Bou

DÉDICACE

﴿وَقُلِ اعْمَلُوا فَسَيَرَى اللَّهُ عَمَلَكُمْ وَرَسُولُهُ وَالْمُؤْمِنُونَ﴾[At-Tawba: 105]

Mon Dieu, à Toi revient la louange, car c'est par Toi que la nuit et le jour sont doux, et c'est par Ton rappel que les instants deviennent agréables.

Je dédie le fruit de ce travail à ceux qui ont été le secret de mon succès et de mon bonheur:

À mes chers parents, mon soutien et ma sécurité, qu'Allah vous récompense abondamment.

À mes frères et sœurs : Farès, Manal, Mohamed Saleh, Rania et Oussama, ma famille sur laquelle je m'appuie.

À Siraj et Elin, la joie et la lumière de la maison.

Et à ma chère grand-mère, dont les prières m'ont accompagnée à chaque étape.

Et à mes deux chères amies et collègues de travail, merci pour la sincérité de votre fraternité et votre soutien inoubliable. Vous avez été les meilleures compagnes sur le chemin de la recherche et de l'effort. Je vous dédie ce mémoire de fin d'études en spécialité « Amélioration des plantes » de l'Université 20 Août 1955 – Skikda. Ce succès est grâce à vous et pour vous, et je n'y serais pas arrivée sans la grâce d'Allah puis votre soutien.

Maissa Bou

RESUME EN FRANÇAIS

Titre : Comparaison de la réponse du blé dur (*Triticum durum* L.) à l'application d'un biofertilisant amélioré

Résumé :

Cette étude s'inscrit dans le cadre de la valorisation et du développement des techniques de fertilisation durable, comme alternative biologique aux intrants chimiques dans les systèmes céréaliers. L'objectif principal était d'évaluer et de comparer l'impact d'un biofertilisant organique solide amélioré, combiné à une application complémentaire de biofertilisant liquide (jus de compost), sur la stimulation de la croissance et de la productivité de deux variétés de blé dur (*Triticum durum* L.) : « Simeto » et « Ammar 6 ». L'expérimentation a été conduite en pots sous serre et au laboratoire à l'Université 20 Août 1955 de Skikda durant l'année académique 2025-2026, en appliquant trois doses croissantes du biofertilisant : un témoin ($T_0 = 0$ g), un traitement à 1% ($T_1 = 50$ g) et un traitement maximal à 3% ($T_2 = 150$ g).

Les résultats montrent que la concentration maximale à 3% (T_2) est le meilleur traitement, optimisant la croissance vegetative (longueur de la tige : 53,53 cm, chlorophylle : 42,88) et maximisant le rendement final avec un record de 17,92 g/pot. Sur le plan variétal, la variété « Ammar 6 » a présenté la meilleure réponse face à la fertilisation, enregistrant une augmentation spectaculaire de rendement de +90,64% sous l'effet de la dose T_2 par rapport au témoin. La variété « Simeto » s'est distinguée par son potentiel génétique intrinsèque pour le poids de 100 grains. En conclusion, l'application de ce biofertilisant à 3% s'avère la formule la plus performante pour une céréaliculture durable.

Mots-clés : Blé dur (*Triticum durum* L.), Biofertilisant, Jus de compost, Croissance, Rendement

.

RESUME EN ANGLAIS

Title: Comparison of the Response of Durum Wheat (*Triticum durum* L.) to the Application of an Enhanced Biofertilizer

Abstract

This study comes within the framework of valorizing and developing sustainable fertilization techniques as an organic alternative to chemical inputs in cereal cropping systems. The main objective was to evaluate and compare the impact of an enhanced solid biofertilizer, combined with a complementary application of a liquid biofertilizer (**compost juice**), on stimulating the growth and productivity of two durum wheat (*Triticum durum* L.) cultivars: "Simeto" and "Ammar 6". The experiment was conducted in pots under greenhouse and laboratory conditions at the University of 20 Août 1955 - Skikda during the 2025–2026 academic year, applying three increasing rates of the biofertilizer: a control (T_0), a 1% treatment (T_1), and a maximal 3% treatment (T_2).

The results demonstrate that the maximum concentration of 3% (T_2) is the most effective treatment, optimizing vegetative growth (shoot length, chlorophyll content) and maximizing the final yield with a record. At the varietal level, the "Ammar 6" cultivar exhibited the best response to fertilization, recording a spectacular yield increase of +90.64% under the effect of the T_2 dose compared to the control. On the other hand, the "Simeto" cultivar was distinguished by its intrinsic genetic potential for the 100-grain weight. In conclusion, the application of this biofertilizer at 3% proves to be the most efficient formula for sustainable cereal production.

Keywords: Durum wheat (*Triticum durum* L.), Biofertilizer, **Compost juice**, Growth, Yield.

RESUME EN ARABE

العنوان : مقارنة استجابة القمح الصلب (*Triticum durum* L.) لتطبيق سماد حيوي مطور

الملخص

تندرج هذه الدراسة في إطار تثمين وتطوير تقنيات التسميد المستدام، كبديل حيوي للمدخلات الكيميائية في نظم زراعة الحبوب. كان الهدف الرئيسي هو تقييم ومقارنة تأثير مخصب حيوي عضوي صلب مطور، مدمج مع تطبيق تكميلي لمخصب حيوي سائل) عصارة الكومبوست(، على تحفيز نمو وإنتاجية صنفين من القمح الصلب (*Triticum durum* L.): "سيميتو" و"عمار 6". أُجريت التجربة في أصص تحت البيوت البلاستيكية وفي المختبر بجامعة 20 أوت 1955 بسكيكدة خلال السنة الجامعية 2025-2026، وذلك بتطبيق ثلاث جرعات متصاعدة من المخصب الحيوي: شاهد (T_0)، معاملة بتركيز 1 (T_1) %، ومعاملة قصوى بتركيز 3 (T_2) %.

أظهرت النتائج أن التركيز الأقصى 3 (T_2) %هو المعاملة الأفضل، حيث ساهم في تحسين النمو الخضري (طول الساق، ومحتوى الكلوروفيل) وتعظيم المردود النهائي برقم قياسي. وعلى الصعيد الصنفي، أبدى الصنف "عمار 6" استجابة مثلى تجاه التسميد، مسجلاً زيادة مذهلة في المردود بلغت +90.64% تحت تأثير الجرعة T_2 مقارنة بالشاهد. في المقابل، تميز الصنف "سيميتو" بإمكانياته الوراثية الكامنة في وزن 100 حبة. ختاماً، أثبت تطبيق هذا المخصب الحيوي بنسبة 3% أنه الصيغة الأكثر كفاءة ومردودية من أجل زراعة حبوب مستدامة.

الكلمات المفتاحية :القمح الصلب(*Triticum durum* L.) ، مخصب حيوي، عصارة الكومبوست، النمو، المردود.

Liste des tableaux

Tableaux	Titre	Page
Tableau 01	Classification botanique du blé dur	04
Tableau 02	Différence entre engrais chimique et biofertilisant organique	17
Tableau 03	Variétés du blé dur étudiées	20
Tableau 04	La répartition des unités expérimentales et des répétitions dans les pots	21
Tableau 05	Caractéristiques physico-chimiques et hydro-physiques du biofertilisant utilisé	23
Tableau 06	Modalités et méthodes d'application des traitements	26
Tableau 07	Propriétés physico-chimiques de la terre témoin ($T0$) avant traitement	34

Liste des Figures

Figures	Titre	Page
Figure 1	Blé dur (Triticum durum L.)	4
Figure 2	Les stades phrénologiques de la plante	7
Figure 3	Classification des fertilisants organiques incluant les biofertilisants	11
Figure 4	Engrais vert	12
Figure 5	Biochar de grignon d'Olive	12
Figure 6	Fumier de bovin	13
Figure 7	Vermicompostage	13
Figure 8	Coquilles d'œufs et graines de café	14
Figure 9	Feuilles sèches des arbres	14
Figure 10	Rôle des biofertilisants pour le maintien de la productivité des cultures et de la santé des sols	18
Figure 11	Vue de la serre expérimentale	19
Figure 12	Les grains de deux variétés testées	20
Figure 13	Dispositif expérimental de l'essai de croissance en pots	22
Figure 14	Pesée de biofertilisant solide appliqués aux pots	24
Figure 15	Incorporation du biofertilisant au sol	24
Figure 16	Évolution de la germination au 1er jour V1 et V2	25
Figure 17	Évolution de la germination au 7ème jour V1 et V2	25
Figure 18	Semis des graines du blé dur dans les pots	26
Figure 19	Application du biofertilisant liquide	26
Figure 20	Photo représentative du profil	28
Figure 21	Mesure de la teneur en chlorophylle des feuilles à l'aide d'un chlorophyllomètre SPAD	30
Figure 22	Pesée du papier calque utilisé pour l'estimation de la surface foliaire	31
Figure 23	Étapes de détermination du poids frais, turgide et sec des feuilles	32
Figure 24	Détermination du poids de 100 grains à l'aide d'une balance de précision	33
Figure 25	Effet des différentes doses du biofertilisant sur la teneur en eau du blé dur chez les deux variétés étudiées	35
Figure 26	Effet des différentes doses du biofertilisant sur la surface foliaire du blé dur chez les deux variétés étudiées	37
Figure 27	Effet des différentes doses du biofertilisant sur la chlorophylle du blé dur chez les deux variétés étudiées	38
Figure 28	Effet des différentes doses du biofertilisant sur la longueur de tige du blé dur chez les deux variétés étudiées.	39
Figure 29	Effet des différentes doses du biofertilisant sur la longueur de l'épi avec barbe chez les deux variétés étudiées.	41
Figure 30	Effet des différentes doses du biofertilisant sur la longueur du col chez les deux variétés étudiées	42

Figure 31	Effet des différentes doses du biofertilisant sur le nombre d'épi chez les deux variétés étudiées	44
Figure 32	Effet des différentes doses du biofertilisant sur le nombre de grains par épi chez les deux variétés étudiées	45
Figure 33	Effet des différentes doses du biofertilisant sur le poids de 100 grains chez les deux variétés étudiées	46
Figure 34	Effet des différentes doses du biofertilisant sur le rendement en grains chez les deux variétés étudiées	47

Liste des abréviations

Abréviation	Signification
Cm	Centimètre
G	Gramme
%	Pourcentage
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
PCG	Poids de 100 grains
TRE	Teneur relative en eau
LT	Longueur de tige
CHLO	Chlorophylle
T_0	Traitement témoin (0g)
T_1	Traitement amendé par 50g (1%)
T_2	Traitement amendé par 150g (3%)
V1	Variété Simeto
V2	Variété Ammar 6
NH_3	Ammoniac
XLSTAT	Logiciel d'analyse et traitement statistique
MADR	Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural

Table des matières

Remerciements
Dédicaces
Résumé en trois langues
Liste des abréviations
Liste des tableaux
Liste des figures

SOMMAIRE

Introduction générale 1

Partie I : Etude Bibliographique

Chapitre 1 : Généralité sur le Blé Dur

1.Historique et origine du blé dur 3
2. Définition du blé dur 3
3. Classification et systématique du blé dur 4
4. Cycle de développement du blé dur 4
4.1. Période végétative 5
4.1.1. Stade de levée 5
4.1.2. Stade de tallage 5
4.2. Période reproductrice 5
4.2.1. Montaison (gonflement) 5
4.2.2. Épiaison – floraison 6
4.2.3. Remplissage du grain 6
4.2.4. Maturation du grain 6
5. Exigences de culture du blé dur 7
5.1. Exigences pédoclimatiques 7
5.1.1. Température 8
5.1.2. Lumière 8
5.1.3. Sol 8
5.1.4. Eau 8
5.2. Exigences culturales 9
5.2.1. Préparation du sol 9
5.2.2. Semis 9

5.2.3. Fertilisation 9
5.2.3.1. Azote 9
5.2.3.2. Phosphore 9
5.2.3.3. Potassium 10

Chapitre II : Généralité sur les biofertilisants

1. Définition du biofertilisant organique 11
2. Types de biofertilisants organiques 11
2-2 Les engrais verts 12
2-1 Biochar 12
2-2 Fumier bovin 12
2-3 Vermicompostage 13
2-4 Déchets ménagers organiques et agricoles humides 13
2-5 Déchets agricoles secs 14
3. Notion de la fertilité du sol 14
4. Mécanismes d'action des biofertilisants organiques 15
5. Rôle des biofertilisants organiques dans la fertilité du sol 15
6. Avantages et bénéfices des biofertilisants organiques 16
7. Limites des biofertilisants à base de PGPR 16
8. Comparaison entre les biofertilisants organiques et les engrais chimiques 17
9. Importance des biofertilisants organiques dans l'agriculture durable 18

Partie II : Etude expérimentale

Chapitre I : Materiel et méthode

1- Objectif de l'essai 19
2.Présentation du site de l'essai 19

2-1 Caractéristique technique de la serre 19
3- Matériel végétal 20
3.1. Semences de blé dur 20
3.2. Origine et caractéristiques des variétés 20
4. Méthodes d'étude 21
4.1. Doses de biofertilisant organique appliquées 21
4.2. Dispositif expérimental 21
5.Le mode de culture et condition de croissance 22
5.1. Origine, préparation et procédé de fabrication du biofertilisant 22
5.2. Caractéristiques physico-chimiques et hydro-physiques du biofertilisant 22
5.3. Préparation des pots, amendement et semis 23
6. Paramètres étudiés 27
6.1.Mesure sur le sol 27
6.2.Mesure sur la plante 30
7.Analyse des données 33

Chapitre II : Résultats et discussion

1.Caractéristiques physico-chimiques initiales du sol témoin 34
2. Effet des biofertilisants sur les caractéristiques morphologiques et la production du blé dur 35
2.1. Teneur relative en eau (TRE %) 35
2.2. Surface foliaire (cm²) 37
2.3. Teneur en chlorophylle 38
2.4. Longueur de tige (Cm) 39
2.5. Longueur de l'épi avec barbe (Cm) 41
2.6. Longueur du col (Cm) 42
2.7. Nombre d'épis 44
2.8. Nombre de grains par épi 45
2.9. Poids de 100 grains (g) 46
2.10. Rendement théorique (g/pot) 47
Conclusion 49
Références bibliographiques 52

Introduction

Introduction générale :

Le blé dur *(Triticum durum* L.*)* représente une culture clé, particulièrement adaptée aux climats arides et semi-arides. Il joue un rôle central dans l'alimentation en fournissant une source importante d'énergie et en servant de matière première pour des produits alimentaires essentiels, comme les pâtes et la semoule. Néanmoins, sa production peut être affectée par des facteurs environnementaux tels que l'élévation des températures, influençant le rendement et la qualité des récoltes **(Abeledo *et al*., 2008 ; Bajji, 1999 cités dans Mouellef, 2010).**

La fertilité des sols dépend largement de la disponibilité des éléments nutritifs essentiels (N, P et K), nécessaires au bon développement des plantes. Les amendements organiques, notamment le fumier et le compost, constituent des sources naturelles de ces éléments tout en améliorant la structure du sol, sa capacité de rétention en eau et son activité biologique. Ces matières stimulent également l'activité microbiologique et favorisent la minéralisation des nutriments. De plus, leur association avec des micro-organismes bénéfiques sous forme de biofertilisants contribue à réduire l'usage des engrais chimiques et à promouvoir une agriculture durable. Parallèlement, l'utilisation de fertilisants organiques liquides permet un apport rapide et ciblé des nutriments, optimisant ainsi la croissance et la productivité des plantes **(Singh *et al*., 2024 ; Aytenew & Bore, 2020 ; Shahzad et al., 2025).**

Les biofertilisants constituent une alternative écologique aux engrais chimiques, en améliorant la fertilité du sol, la croissance des cultures et la productivité agricole dans les systèmes durables. Ces produits combinent des micro-organismes bénéfiques tels que les bactéries rhizosphériques, les champignons mycorhiziens et d'autres consortiums microbiens pour optimiser l'assimilation des nutriments, renforcer la structure du sol et améliorer la résilience des plantes face aux stress environnementaux. Des études spécialisées sur le blé ont montré que ces biofertilisants peuvent augmenter le rendement, améliorer la nutrition des plantes et soutenir la fertilité du sol, illustrant ainsi leur rôle dans une production alimentaire durable tout en réduisant la dépendance aux intrants chimiques **(Shahzad et al., 2025 ; Ntsomboh Ntsefong et al., 2025 ; Pradhan et al., 2025)**.

Dans ce contexte, se pose une problématique centrale : comment l'application d'un biofertilisant amélioré peut-elle optimiser la croissance et la productivité de deux variétés de blé dur *(Triticum durum* L.*)* en fonction des différentes doses de biofertilisants organiques, alors que ses effets réels sur la production restent encore peu documentés ?

Les objectifs spécifiques de ce travail visent à :

1. Comparer la croissance de deux variétés de blé dur *(Triticum durum* L.*)* sous l'influence du biofertilisant amélioré.

2. Analyser l'influence de ces traitements sur les paramètres morphologiques (taille des plantes, nombre d'épis) et physiologiques (taux de chlorophylle, teneur en eau) du blé dur.

3. Évaluer leur impact sur la productivité et la qualité des récoltes (rendement en grains, poids de 100 grains).

Les hypothèses proposées sont :

1. L'application d'un biofertilisant amélioré aura un effet positif sur la croissance des deux variétés de blé dur.

2. Les plantes traitées avec le biofertilisant présenteront de meilleurs paramètres morphologiques et physiologiques que les témoins non traités.

3. L'usage du biofertilisant améliorera le rendement et la qualité des récoltes, mais cet effet pourra varier selon le type de sol et la variété de blé.

Ce mémoire est structuré en deux parties. **La partie I**, relative à l'étude bibliographique, comprend le **Chapitre I** intitulé « Généralités sur le blé dur » et le **Chapitre II** intitulé « Généralités sur les biofertilisants ». **La partie II**, consacrée à l'étude expérimentale, comporte le **Chapitre I** « Matériel et méthodes » et le **Chapitre II** « Résultats et discussion ».

PREMIERE PARTIE :

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I

1. Historique et origine du blé dur :

Le blé est une espèce cultivée depuis la plus haute Antiquité et constitue, dès l'origine de l'agriculture, une base essentielle de l'alimentation humaine (Ruel, 2006 ; Yves et Buyer, 2000). Son apparition remonte à environ 15 000 ans avant J.-C., dans la région du Croissant fertile, comprenant notamment la vallée du Jourdain, la Palestine, la Jordanie, l'Irak et l'ouest de l'Iran (Feldman et Sears, 1981 ; Mouellef, 2010). Cette période correspond à la transition des sociétés humaines du mode de vie de chasseurs-cueilleurs vers l'agriculture, favorisée par des changements climatiques ainsi que par la domestication progressive des plantes (Wadley et Martin, 1993 in Ouanzar, 2012).

Le blé constitue l'une des principales ressources alimentaires de l'humanité, et son histoire est étroitement liée à celle de l'agriculture et au développement des sociétés humaines. Sa culture s'inscrit dans la période néolithique, marquée par l'apparition des premières formes d'agriculture il y a environ 8000 ans en Europe. Les formes les plus anciennes de blé semblent toutefois avoir été domestiquées dans la région du Croissant fertile en Mésopotamie, où le blé dur figure parmi les premières espèces cultivées (Feillet, 2000).

Au cours de cette évolution, les blés ont d'abord évolué naturellement avant d'être progressivement influencés par la sélection exercée par les premiers agriculteurs, ce qui a conduit à la diversification des formes cultivées. Par ailleurs, des travaux d'inventaire et de collecte, notamment ceux de Léon Ducellier, ont permis d'identifier et de caractériser de nombreuses variétés de blé présentant des qualités agronomiques variées, telles que la productivité, la résistance à la sécheresse et aux maladies (Henry et Buyser, 2001).

2. Définition du blé dur :

Le blé dur *(Triticum durum* L.*)* est constitué de grains issus des variétés appartenant à l'espèce *Triticum durum* L. (Commission du Codex Alimentarius, 2007). Cette espèce se distingue du blé tendre *(Triticum aestivum)* par ses caractéristiques génétiques, morphologiques et physiologiques spécifiques (Hélène, 2010). Sur le plan nutritionnel et économique, le blé dur représente une ressource importante dans l'alimentation humaine, notamment en tant que source de protéines, et occupe une place significative dans la production mondiale de céréales, après le blé tendre, le riz, le maïs et l'orge (Mazouz, 2006).

Sur le plan technologique et réglementaire, le blé dur est également défini par ses caractéristiques physiques et industrielles. Il doit présenter une couleur variant du jaune ambré

au brun **(Figure 01)**, ainsi qu'une cassure vitreuse, translucide et d'aspect corné, critères utilisés pour distinguer les qualités adaptées à la transformation industrielle (Grignac, 1978).



Figure 01 : Blé dur (*Triticum durum* L.) Victime Walker (2018).

3. Classification et systématique du blé dur

Le blé est une plante monocotylédone appartenant à la famille des Poaceae (Gramineae) et au genre *Triticum*. Il s'agit d'une céréale dont le fruit est un caryopse, c'est-à-dire un fruit sec indéhiscent constitué d'une graine soudée aux téguments (Feillet, 2000).

La classification botanique du blé dur *(Triticum durum* L.*)* est présentée comme suit, selon Prat (1971) et Feillet (2000) :

Tableau 1 : Classification botanique du blé dur (prat, 1971 ; Feillet 2000)

Classification	**Rang taxonomique**
Angiospermes	Embranchement
Spermaphytes	Sous-embranchement
Monocotylédones	Classe
Glumiflorales	Ordre
Commeliniflorales	Super-ordre
Poaceae (Gramineae)	Famille
Triticeae	Tribu
Triticum	Genre
***Triticum durum* L.**	Espèce

4. Cycle de développement (stades phénologiques) du blé dur :

Le cycle de développement du blé dur **(Figure 02)** se caractérise par une succession de stades phénologiques bien définis, identifiables à l'aide de systèmes de classification standardisés tels que Zadoks ou BBCH. Cette approche permet de suivre avec précision l'évolution de la plante et constitue un outil essentiel pour la gestion des interventions culturales et l'optimisation du rendement (Lancashire et al., 1991).

4.1. Période végétative

La phase végétative s'étend de la germination jusqu'à l'initiation de l'épi. Elle correspond à une phase de mise en place progressive de la structure de la plante, marquée par des modifications morphologiques visibles (Slafer & Rawson, 1994).

4.1.1. Stade de levée

La levée correspond à l'émergence des plantules à la surface du sol, généralement lorsque environ 50 % des graines ont germé. Elle débute par l'imbibition de la graine, suivie de l'élongation du coléoptile et de l'apparition de la première feuille. Ce stade se caractérise par les premières transformations morphologiques visibles de la jeune plante, notamment l'installation des organes foliaires primaires (Rodrigues et al., 2022).

4.1.2. Stade de tallage

Le tallage débute après l'apparition de la troisième feuille et correspond à la formation de talles secondaires, puis parfois tertiaires, à partir de la base de la plante. Cette phase entraîne une augmentation du nombre de tiges et une structuration progressive de l'architecture végétative, influençant directement le potentiel productif de la culture (Rodrigues et al., 2022).

4.2. Période reproductrice

Cette phase succède à la croissance végétative et comprend les étapes de formation, de développement et de maturation du grain. Elle joue un rôle déterminant dans la définition du rendement final (Rodrigues et al., 2022).

4.2.1. Montaison (gonflement)

La montaison est caractérisée par l'allongement des entre-nœuds et la montée progressive de l'épi à l'intérieur de la tige. Elle correspond à une phase de croissance rapide, accompagnée de modifications morphologiques importantes, notamment l'augmentation de la hauteur de la plante et le gonflement de la gaine foliaire (Li et al., 2024).

4.2.2. Épiaison – floraison

L'épiaison correspond à l'émergence progressive de l'épi hors de la gaine foliaire, tandis que la floraison (anthèse) est marquée par l'ouverture des fleurs, la libération du pollen et la fécondation. Cette phase constitue une étape morphologique clé du cycle reproductif et conditionne fortement la fertilité des épis (Ferrante et al., 2023).

4.2.3. Remplissage du grain

Durant cette phase, les assimilats produits par la plante sont mobilisés et transférés vers les grains en développement. Cette étape repose principalement sur les réserves accumulées durant les phases précédentes et contribue directement à l'augmentation de la taille et de la masse des grains (Plaut et al., 2004).

4.2.4. Maturation du grain

La maturation débute après la stabilisation du contenu hydrique du grain et se poursuit par une diminution progressive de son humidité. Le grain passe progressivement d'un état tendre à un état dur et cassant, marquant la fin de son développement physiologique et morphologique (Corinne et al., 2020). Les stades phénologiques du blé dur, de la germination jusqu'à la maturation, résument l'ensemble du cycle de développement de la plante et constituent une base essentielle pour le suivi agronomique et la planification des interventions culturales (Zadoks et al., 2024).

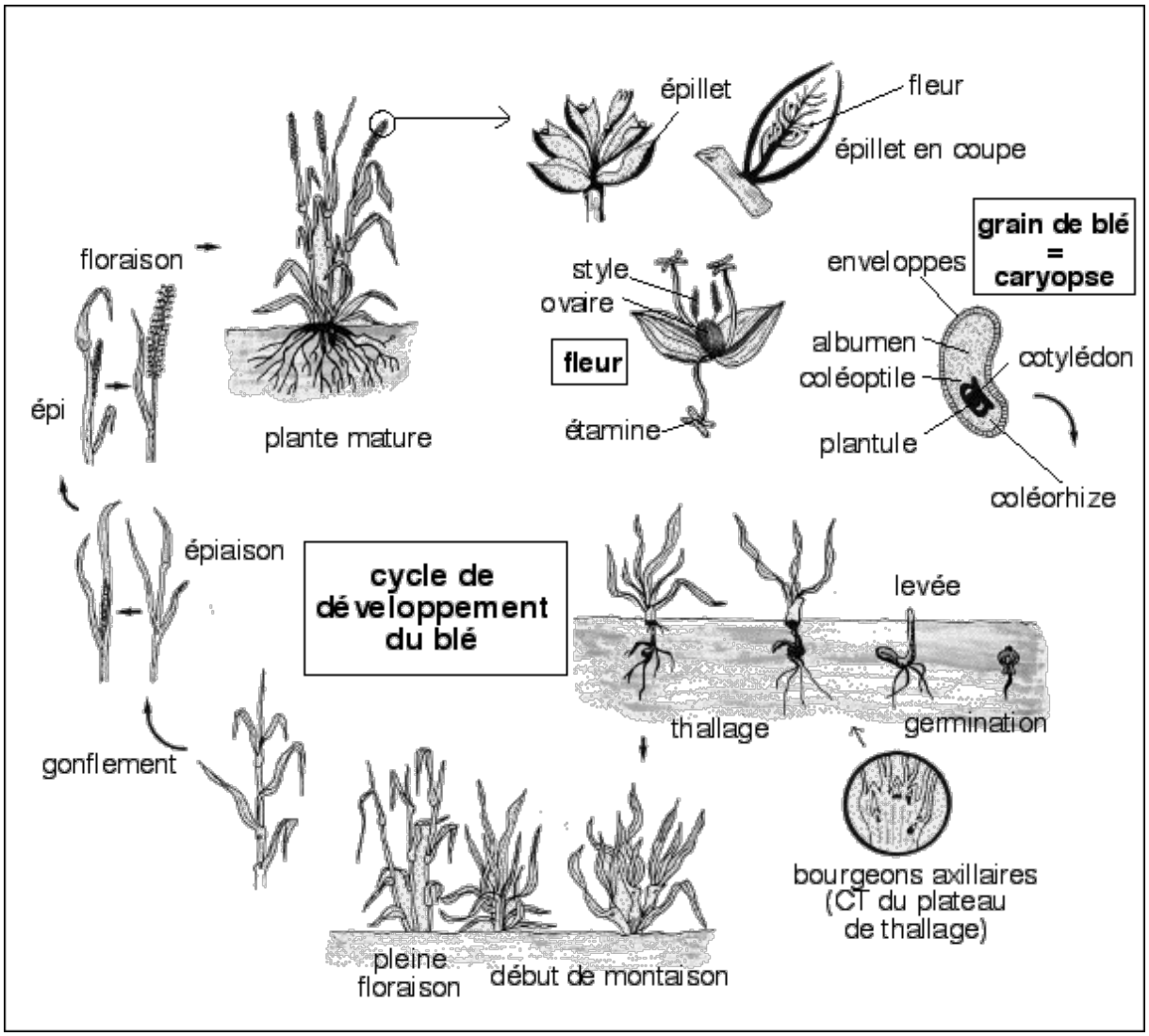


Figure 02 : Les stades phrénologiques de la plante Yves Henry & Jacques de Buyser (2000).

5. Exigences de culture du blé dur :

La réussite de la culture du blé dur dépend de l'interaction entre les conditions environnementales et la gestion des pratiques culturales. En effet, le potentiel de croissance, de développement et de rendement de cette céréale est fortement influencé par les caractéristiques pédoclimatiques ainsi que par les interventions agronomiques appliquées tout au long du cycle cultural (Liotard et al., 2024).

1. Exigences pédoclimatiques

Le développement du blé dur est étroitement conditionné par les facteurs climatiques et édaphiques. Le bon déroulement de son cycle végétatif et reproductif repose sur un équilibre entre la température, la lumière, l'humidité du sol, les propriétés physico-chimiques du sol et

la disponibilité en eau. Cette espèce se distingue par sa sensibilité aux stress abiotiques tels que les températures élevées, la sécheresse et la salinité, ce qui rend la maîtrise de ces paramètres essentielle pour améliorer les performances productives, notamment en zones arides et semi-arides (Liotard et al., 2024).

5.1.1. Température

La température constitue un facteur déterminant du développement du blé dur, influençant aussi bien la germination que la croissance et l'initiation des phases reproductives. La germination peut débuter à partir de températures proches de 0 °C, tandis que l'optimum de croissance se situe généralement entre 15 et 25 °C. Les stades de montaison et d'initiation florale sont particulièrement sensibles aux variations thermiques ainsi qu'à leur interaction avec la photopériode. Le développement de la plante est également lié à l'accumulation de degrés-jours nécessaires à l'expression des différentes phases phénologiques (Batlla & Benech-Arnold, 2015).

5.1.2. Lumière

La lumière joue un rôle fondamental dans le processus de photosynthèse et dans le développement végétatif, notamment au stade de tallage. Un éclairement optimal favorise la production de biomasse et améliore la structure de la plante. À l'inverse, un déficit lumineux peut entraîner un allongement excessif des entre-nœuds et une diminution de la fertilité des épis, affectant ainsi le rendement final (Li et al., 2024).

5.1.3. Sol

Le blé dur se développe préférentiellement sur des sols profonds, bien drainés, de texture limono-argileuse ou argilo-siliceuse. Bien qu'il tolère les sols calcaires, il reste sensible à la salinité. Un pH compris entre 6,5 et 7,5 est considéré comme optimal pour assurer la disponibilité des éléments nutritifs et un bon développement racinaire (Rankel, 2024).

5.1.4. Eau

Les besoins hydriques du blé dur sont estimés à environ 800 mm par cycle cultural. Certaines phases, notamment celle correspondant au stade « épi 1 cm » ainsi que la période post-floraison, sont particulièrement sensibles au stress hydrique. Une irrigation bien maîtrisée durant ces périodes critiques permet de préserver le rendement, surtout dans les conditions climatiques arides (El-Hendawy et al., 2023).

5.2. Exigences culturales

Les performances du blé dur dépendent également de la qualité des pratiques culturales mises en œuvre. Une gestion agronomique adaptée, incluant la préparation du sol, la conduite du semis et la fertilisation équilibrée, permet d'optimiser le développement de la culture et d'améliorer le rendement ainsi que la qualité du grain (Matthews et al., 2024).

5.2.1. Préparation du sol

La préparation du sol doit être adaptée à sa texture afin d'assurer une bonne structure et une levée homogène. La profondeur de travail varie généralement entre 12 et 15 cm pour les sols légers et peut atteindre 20 à 25 cm pour les sols plus lourds. Un affinage de surface est recommandé pour favoriser une germination rapide et uniforme (Six & Schneider, 2022).

5.2.2. Semis

Les études menées en zones méditerranéennes montrent que le semis automnal, réalisé entre fin octobre et mi-novembre, permet un développement initial optimal. Une profondeur de semis de 2,5 à 3 cm et un écartement de 15 à 25 cm favorisent une levée homogène et une meilleure implantation de la culture en conditions semi-arides (Yagmur & Kaydan, 2009).

5.2.3. Fertilisation

Une fertilisation raisonnée basée sur les éléments majeurs (N, P, K) est essentielle pour assurer à la fois le rendement et la qualité du grain, tout en préservant la durabilité des sols. L'efficacité de cette fertilisation dépend de son adaptation aux conditions agroécologiques locales (Gadaleta et al., 2022).

5.2.3.1. Azote

Le fractionnement de l'azote, notamment aux stades de tallage et de montaison, constitue une stratégie efficace pour optimiser son utilisation par la plante tout en limitant les pertes et les impacts environnementaux (Gamal & El-Miniawy, 2018).

5.2.3.2. Phosphore

Des apports en phosphore compris entre 60 et 120 kg P_2O_5/ha, réalisés principalement au semis et au tallage, permettent d'améliorer significativement le rendement, en particulier sur les sols déficients (Gadaleta et al., 2022).

5.2.3.3. Potassium

Des essais réalisés en Algérie montrent qu'un apport d'environ 100 kg K_2O/ha améliore la biomasse, le rendement et la résistance de la plante aux stress hydriques (Messaoudi et al., 2023).

Chapitre II

1. Définition du biofertilisant organique :

Les biofertilisants organiques constituent une alternative particulièrement intéressante, car ils associent des avantages agronomiques et environnementaux **(FAO, 2020)**.

Les biofertilisants organiques sont des substances d'origine naturelle, issues de matières végétales, animales, microbiennes ou minérales. Contrairement aux engrais de synthèse, ils ne sont pas produits par des procédés chimiques industriels, mais proviennent de ressources biologiques renouvelables. Ils se caractérisent par leur biodégradabilité, leur faible toxicité et leur conformité aux normes de l'agriculture biologique. Parmi les exemples les plus courants figurent le compost et le fumier **(Bhattacharjee et Dey, 2014)**.

2. Types de biofertilisants organiques :

Les biofertilisants organiques constituent une catégorie importante des amendements utilisés en agriculture durable. Ils regroupent différentes formes de matières organiques issues de sources variées, dont les caractéristiques et les modes d'action peuvent différer selon leur origine et leur processus de transformation. Afin de mieux structurer cette diversité, il est nécessaire de les classer en plusieurs types. Dans cette optique, le schéma suivant présente une classification générale des biofertilisants organiques.

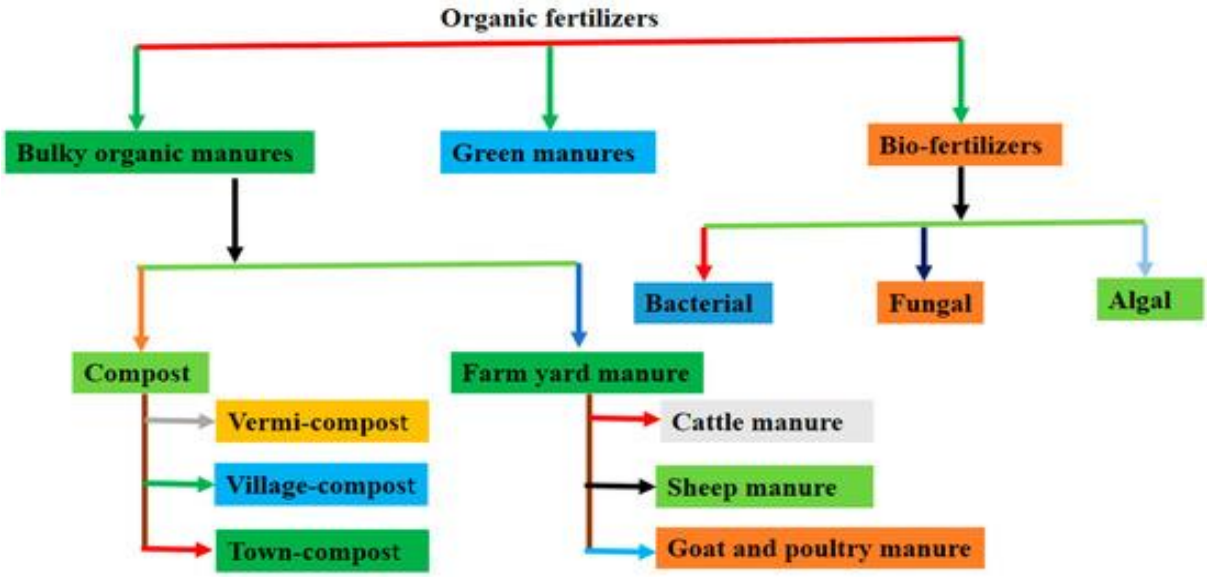


Figure 03 : Classification des fertilisants organiques incluant les biofertilisants. MDPI. (2024).

Les biofertilisants organiques peuvent être classés en plusieurs catégories :

2-2 Les engrais verts :

Les engrais verts sont des cultures à croissance rapide, implantées temporairement puis enfouies dans le sol avant leur maturité. Utilisés entre deux cultures principales, ils assurent une couverture végétale qui limite l'érosion et le lessivage des nutriments. Grâce à leur système racinaire, ils améliorent la structure du sol et contribuent à son enrichissement en matière organique et en éléments nutritifs, notamment en azote, participant ainsi à l'amélioration de la fertilité du sol. (EOS Data Analytics, 2025).



Figure 04 : Engrais vert (Touil et Bouhafer, 2025).

2-1 Biochar :

Le biochar est un matériau carboné stable, comparable au charbon, obtenu par pyrolyse de matières organiques en conditions pauvres en oxygène. Ce procédé se distingue de la combustion classique par l'absence quasi totale d'oxygène, permettant ainsi de préserver une structure riche en carbone. Il est généralement produit à partir de biomasse ligneuse, mais peut également être issu de résidus végétaux, de litière animale ou de fumier. Le biochar améliore les propriétés physico-chimiques du sol, notamment la rétention en eau et la disponibilité des éléments nutritifs. (BHG, 2026).



Figure 05 : biochar de grignon d'Olive (Touil et Bouhafer, 2025).

2-2 Fumier bovin :

Le fumier bovin provient d'un mélange de déjections des bovins et de la litière, qui se décompose progressivement lors du stockage en étable ou en tas. Après fermentation, il devient une source riche en matière organique et en éléments nutritifs, contribuant ainsi à l'amélioration de la fertilité du sol. (Amouzou in Adden, 2004 ; Petit et Jobin, 2005).



Figure 06 : Fumier de bovin (Touil et Bouhafer, 2025).

2-3 Vermicompostage

Le vermicompostage est un produit stable et riche en humus issu de la décomposition de matières organiques sous l'action combinée des micro-organismes et des vers de terre (Duplessis, 2002). Il est obtenu à partir de différents substrats organiques tels que les fumiers, les résidus de récolte, les déchets agro-industriels ou ménagers (Mustin 1987).

Ce processus biologique permet une dégradation efficace de la matière organique et aboutit à un amendement riche en éléments nutritifs, contribuant ainsi à l'amélioration de la fertilité du sol. (Petit et Jobin, 2005).



Figure 07 : Vermicompostage (Touil et Bouhafer, 2025).

2-4 Déchets ménagers organiques et agricoles humides

Les déchets ménagers organiques et certains déchets agricoles humides peuvent être utilisés comme matières fertilisantes du sol. Cependant, lorsqu'ils sont apportés directement au sol à

l'état brut, ils peuvent entraîner des déséquilibres nutritionnels, notamment une rétrogradation de l'azote, ce qui peut nuire au développement des plantes. Pour cette raison, leur valorisation est généralement réalisée après compostage afin d'améliorer leur stabilité et leur efficacité agronomique (Messiean in Adden, 2004).



Figure 08 : Coquilles d'œufs et graines de café (Touil et Bouhafer, 2025).

2-5 Déchets agricoles secs

Les déchets agricoles secs correspondent à des résidus végétaux issus des activités agricoles, notamment les pailles, les tiges, les feuilles sèches ainsi que les résidus de récolte. Ces matières organiques peuvent être valorisées par compostage ou intégrées directement au sol, ce qui permet d'augmenter sa teneur en matière organique. Leur valorisation contribue ainsi à l'amélioration des propriétés physiques et biologiques du sol, tout en favorisant une gestion durable et un recyclage efficace des résidus agricoles (FAO, 2014).



Figure 09 : Feuilles sèches des arbres (Touil et Bouhafer, 2025).

3. Notion de la fertilité du sol

Le sol constitue un milieu vivant et complexe qui abrite une grande diversité d'organismes participant au fonctionnement des écosystèmes. Il résulte de l'altération progressive de la roche mère sous l'influence de facteurs physiques, chimiques et biologiques (Jones, 2012).

La fertilité du sol correspond à sa capacité à fournir aux plantes les éléments nutritifs essentiels en quantités suffisantes et équilibrées pour assurer leur croissance et leur développement (Foth et Ellis, 1988 ; Subhash, 2014).

Elle repose principalement sur les propriétés physicochimiques du sol, qui influencent la disponibilité des nutriments et les conditions de croissance des végétaux (Benton et Jones, 2012).

Ces propriétés peuvent être améliorées ou modifiées par différentes pratiques de gestion, notamment par l'apport de substances organiques, biologiques ou minérales.

4. Mécanismes d'action des biofertilisants organiques

Les biofertilisants agissent grâce à l'activité de micro-organismes bénéfiques qui interagissent avec les plantes et le sol. Ces micro-organismes améliorent la disponibilité des éléments nutritifs, stimulent la croissance végétale et contribuent à l'amélioration des propriétés biologiques du sol (Chaparro et al., 2012 ; Wasai et Minamisawa, 2018).

Leurs mécanismes d'action peuvent être directs ou indirects. Les mécanismes directs reposent principalement sur la fixation biologique de l'azote, la solubilisation du phosphore ainsi que la production de substances favorisant la croissance des plantes. Les mécanismes indirects concernent notamment la protection des cultures contre certains agents pathogènes et l'amélioration de la résistance des plantes aux stress environnementaux, ce qui contribue à une meilleure productivité agricole (Malik et Sindhu, 2011 ; Glick et Gamalero, 2021).

5. Rôle des biofertilisants organiques dans la fertilité du sol

Les biofertilisants organiques jouent un rôle fondamental dans l'amélioration de la fertilité du sol grâce à l'apport en matière organique. Cette dernière contribue à la stabilisation de la structure du sol en favorisant l'agrégation des particules et en améliorant ses propriétés hydriques. Lors de sa décomposition, la matière organique stimule l'activité des micro-organismes du sol et permet la libération progressive des éléments nutritifs essentiels au développement des plantes. Elle favorise également la rétention de l'eau, assurant ainsi un environnement propice au développement racinaire et à la productivité des cultures (Tisdall & Oades, 1982 ; Cambardella & Elliott, 1993 ; Puget et al., 1995 ; Elliott, 1986 ; Le Bissonnais, 1996). Au-delà de leur action directe sur les propriétés du sol, les biofertilisants présentent des effets bénéfiques à différentes échelles agronomiques et environnementales.

6. Avantages et bénéfices des biofertilisants organiques

Les biofertilisants organiques offrent de nombreux avantages liés à l'amélioration des propriétés du sol et au fonctionnement des écosystèmes agricoles (LIDA Plant Research, s.d.). Ils favorisent l'augmentation de la fertilité et de la biodiversité du sol grâce à l'activité des micro-organismes bénéfiques. Ils améliorent également l'absorption de l'eau et des éléments nutritifs en stimulant l'activité microbienne, la fixation du carbone et le développement racinaire via les mycorhizes. Par ailleurs, ils contribuent à la structuration et à la protection du sol contre sa dégradation, tout en permettant une réduction des coûts de production et de l'utilisation des engrais chimiques. Enfin, leur valorisation des déchets organiques s'inscrit dans une logique d'agriculture durable et respectueuse de l'environnement.

7. Limites des biofertilisants à base de PGPR

L'utilisation des biofertilisants à base de micro-organismes, notamment les PGPR, suscite un intérêt croissant en agriculture moderne. Cependant, leur application à grande échelle reste confrontée à plusieurs contraintes, particulièrement lors du passage du laboratoire au champ (Sessitsch & Mitter, 2015).

En effet, la sélection des souches efficaces repose généralement sur des tests en conditions contrôlées, basés sur des mécanismes directs et indirects de promotion de la croissance des plantes. Toutefois, une bonne performance en laboratoire ne garantit pas nécessairement une efficacité similaire en conditions réelles de culture. À l'inverse, certaines souches présentant des performances limitées in vitro peuvent développer des stratégies alternatives de promotion de la croissance, mais sont parfois écartées lors du processus de sélection initial (Cardinale et al., 2015).

Ainsi, l'évaluation des PGPR reste complexe, car tous les mécanismes impliqués dans la promotion de la croissance végétale ne sont pas encore totalement élucidés. Cela constitue une contrainte majeure pour leur sélection et leur utilisation à grande échelle, limitant parfois l'exploitation de souches potentiellement efficaces dans des conditions naturelles (Sessitsch & Mitter, 2015 ; Cardinale et al., 2015). Les PGPR représentent un modèle important des biofertilisants microbiens.

8. Comparaison entre les biofertilisants organiques et les engrais chimiques

Tableau 02 : Différence entre engrais chimique et biofertilisant organique (Gérald et al., 2011).

Critères	Biofertilisants	Engrais chimiques
Mode d'action	Ils agissent indirectement en stimulant l'activité biologique du sol et les micro-organismes bénéfiques, ce qui favorise une libération progressive des nutriments et le maintien de l'équilibre du sol.	Ils fournissent directement des nutriments minéraux immédiatement assimilables par les plantes, avec une action rapide mais moins progressive.
Impact sur le sol	Ils contribuent à l'amélioration de la fertilité du sol et au maintien de sa structure biologique grâce à l'augmentation de la matière organique et de la biodiversité microbienne.	Leur utilisation intensive peut entraîner une dégradation de la structure du sol et une diminution progressive de sa fertilité naturelle.
Impact environnemental	Ils sont considérés comme une solution respectueuse de l'environnement, limitant les effets négatifs sur les écosystèmes agricoles.	Ils peuvent provoquer des impacts environnementaux négatifs, notamment la pollution des eaux par lessivage des éléments chimiques.
Durabilité	Ils s'inscrivent dans une approche d'agriculture durable et à long terme.	Leur efficacité est rapide mais peut être associée à des effets néfastes à long terme sur l'écosystème.

9. Importance des biofertilisants organiques dans l'agriculture durable

Les biofertilisants constituent une alternative biotechnologique durable et efficace pour l'agriculture moderne (Kalia et al., 2020 ; Suhag, 2016 ; Bhardwaj et al., 2014). Leur application, notamment par inoculation de micro-organismes, améliore l'absorption des nutriments par les plantes et renforce leur résistance aux stress biotiques et abiotiques, contribuant ainsi à une meilleure productivité des cultures. Ils participent également à la restauration et au maintien de la fertilité des sols, tout en stimulant la croissance végétale. Par ailleurs, leur utilisation permet de réduire les impacts négatifs sur l'environnement et la santé humaine, les positionnant comme une solution essentielle pour une agriculture durable et respectueuse des écosystèmes (Atieno et al., 2020 ; Pravin et al., 2016 ; Sivasakthi et al., 2014).

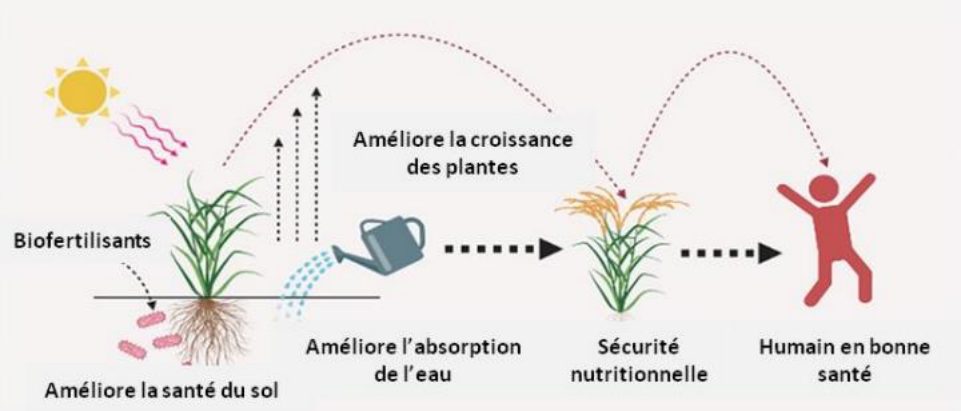


Figure 10 : Rôle des biofertilisants pour le maintien de la productivité des cultures et de la santé des sols (Sreethu *et al*., 2023).

Deuxième Partie : Etude Expérimental

CHAPITRE 1 : Matériel et Méthode

1- Objectif de l'essai :

Évaluer et comparer la réponse de deux variétés de blé dur *Triticum durum* L., « Simeto » et « Ammar 6 » à l'application de différents programmes de biofertilisation. L'étude comprend un traitement témoin non traité (**T0 = 0 g**) et deux doses d'apport du biofertilisant organique solide : **T1 = 50 g** (1%) et **T2 = 150 g** (3%), combinées à une application complémentaire de biofertilisant liquide (*jus de compost*).

2.Présentation du site de l'essai :

L'étude a été réalisée au niveau du laboratoire et de la serre d'agronomie de la Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Département d'Agronomie, Université 20 Août 1955 Skikda, durant l'année académique 2025-2026.

2-1 Caractéristique technique de la serre : La serre utilisée est de type chapelle et présente les caractéristiques techniques suivantes :

- Largeur : 6,66 m
- Longueur : 12,00 m
- Hauteur sous chéneaux : 2,80 m
- Hauteur au faîtage : 4,10 m
- Pente de la toiture cintrée : 42 %
- Surface totale : 82,00 m² ,Cette serre a permis la conduite des essais dans des conditions contrôlées.



Figure 11 : Vue de la serre expérimentale **(Photo personnelle)**.

3- Matériel végétal :

3.1. Semences de blé dur :

L'étude a été réalisée sur deux variétés de blé dur (*Triticum durum* L.), à savoir Simeto et Ammar 6, fournies par le site de Dali El Arbi – Harrouch. **(Figure 12)**

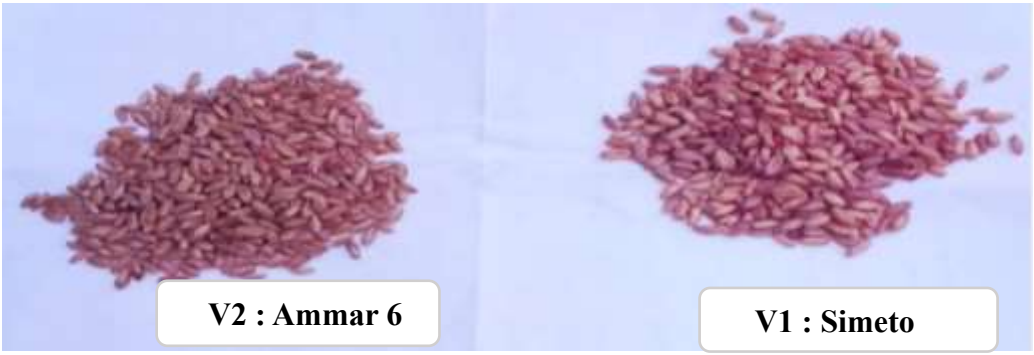


Figure 12: Les grains de deux variété testées **(Photo personnelle)**.

3.2. Origine et caractéristiques des variétés :

L'origine et les caractéristiques des variétés étudiées sont regroupées dans le **(Tableau 03)**.

Tableau 03 : Variétés du blé dur étudiées (CNCC, 2016)

Variété	Origine	Caractéristiques
Simeto	Italienne	Variété à épis barbés noirs et longs, à rendement élevé. Elle présente une PMG élevée, une bonne qualité semoulière et une teneur en protéines d'environ 15,8 %. (Ladjal et Lazouzi., 2014), (C.N.C.C., 2016)
Ammar 6	Algérienne	Variété de type hiver à cycle végétatif précoce. Elle se caractérise par un tallage important, un rendement en grain élevé (≈ 50 qx/ha) et une PMG élevée. (Boufenar-Zaghouane et Zaghouane., 2006)

4- Méthodes d'étude

4.1. Doses de biofertilisant organique appliquées :

Trois traitements ont été appliqués au niveau des unités expérimentales :

- T0 : traitement témoin (sans biofertilisant organique)
- **T1 :** Application de 50 g (1%) de biofertilisant solide, **complétée par des applications de jus de compost (50 ml/L)**.
- **T2 :** Application de 150 g (3%) de biofertilisant solide, **complétée par des applications de jus de compost (50 ml/L)**.

4.2. Dispositif expérimental :

L'expérimentation a été conduite sous serre durant 169 jours, du 14 décembre 2025 au 31 mai 2026. Le dispositif adopté est un dispositif en blocs complètement randomisés factoriel).

Trois répétitions ont été réalisées pour chaque traitement et pour les deux variétés étudiées, soit : 3 (Traitements) × 2 (Variétés) × 3 (Répétitions) = 18 unités expérimentales (pots).

Tableau 04 : La répartition des unités expérimentales et des répétitions dans les pots

Variétés	**V1 : Simeto**			**V2 : Ammar 6**		
T/R	T0	T1	T2	T0	T1	T2
R1	V1T0R1	V1T1R1	V1T2R1	V2T0R1	V2T1R1	V2T2R1
R2	V1T0R2	V1T1R2	V1T2R2	V2T0R2	V2T1R2	V2T2R2
R3	V1T0R3	V1T1R3	V1T2R3	V2T0R3	V2T1R3	V2T2R3

- **R1, R2, R3:** Les trois répétitions.
- **T0 :** Traitement témoin (0 g/pot).
- **T1 :** Traitement à la dose de 1% (soit 50 g/pot) de biofertilisant organique solide **associé au biofertilisant liquide**.
- **T2 :** Traitement à la dose de 3% (soit 150 g/pot) de biofertilisant organique solide **associé au biofertilisant liquide**.



Figure 13: Dispositif expérimental de l'essai de croissance en pots **(photo personnelle)**.

5-Le mode de culture et condition de croissance

5.1.Origine, préparation et procédé de fabrication du biofertilisant :

Le biofertilisant utilisé dans cette expérimentation (sous ses deux formes : solide et liquide) est un produit biologique issu d'un travail antérieur réalisé par Touil et Bouhafer (2025) dans le cadre d'un projet de mémoire Start-up à l'Université de Skikda.

Ce produit a été obtenu par compostage aérobique et vermicompostage d'un mélange optimisé de biomasse végétale (engrais verts et déchets agricoles secs), de déchets ménagers organiques, de fumier de bovins et de biochar de grignon d'olive. Dans le cadre de notre étude, ce fertilisant a été appliqué afin d'évaluer son arrière-effet et son efficacité agronomique sur deux variétés de blé dur.

5.2.Caractéristiques physico-chimiques et hydro-physiques du biofertilisant :

Les propriétés physico-chimiques, chimiques et hydro-structurales du biofertilisant solide, déterminées préalablement par **Touil et Bouhafer (2025)**, sont résumées dans le **Tableau 05**.

Tableau 05 : Caractéristiques physico-chimiques et hydro-physiques du biofertilisant utilisé.

Paramètres Analytiques	Valeurs (Produit Final)
Ph	7,99
Conductivité Électrique (CE) (mS/cm)	1,6
Matière Organique (MO) (%)	73 %
Carbone organique (C) (%)	36,5 %
Azote total (N) (%)	1,95 %
Rapport C/N	18,71
Anhydride phosphorique (P_2O_5) (%)	1,3 %
Oxyde de potassium (K_2O) (%)	1,9 %
Capacité d'Échange Cationique (CEC) (cmol/kg)	40
Capacité de rétention en eau (%)	92 %
Porosité (%)	67,2 %

5.3.Préparation des pots, amendement et semis :

- **Définition des programmes de fertilisation (Traitements) :**

Dans cette expérimentation, les traitements étudiés (T0, T1, T2) représentent des programmes de biofertilisation intégrés, combinant l'apport initial du biofertilisant solide au sol et l'application complémentaire du biofertilisant liquide (*jus de compost*) en cours de cycle :

- T0 (Témoin) : Traitement de contrôle, conduit sur sol naturel sans aucun apport (ni solide, ni liquide).
- T1 (Dose minimale) : Application de 50 g/pot (1% du poids du sol) de biofertilisant solide avant semis, complétée par des irrigations et pulvérisations de jus de compost dilué à 50 ml/L aux stades tallage et montaison.

- T2 (Dose maximale) : Application de 150 g/pot (3% du poids du sol) de biofertilisant solide avant semis, complétée par le même programme de jus de compost liquide (50 ml/L) aux mêmes stades phénologiques.

➢ **Préparation du sol et amendement :** Le sol destiné à l'essai, provenant de la région d'El Hadaeik (Skikda), a été préalablement séché à l'air libre et tamisé afin d'éliminer les débris grossiers et d'obtenir une texture homogène. Ensuite, 18 pots en plastique ont été préparés, chacun rempli avec 5 kg de ce sol. Pour les pots amendés, les doses correspondantes (50 g pour T1 et 150 g pour T2) ont été pesées avec précision (**Figure 14**) et incorporées de manière homogène dans la partie supérieure du sol de chaque pot (**Figure 15**). Une légère irrigation de stabilisation a été effectuée juste avant le semis.



Figure 14 : Pesée de biofertilisant solide appliqués aux pots (Photo personnelle).



Figure 15 : Incorporation du biofertilisant au sol **(Photo personnelle)**.

➢ **Test de germination :** Avant le semis, un test de germination a été réalisé pour évaluer la viabilité des semences. Pour chaque variété, 20 graines ont été placées en boîtes de Petri dans des conditions favorables. Le taux de germination a été suivi et validé (**Figure 16 et Figure 17).**



V2 : Ammar 6 V1 : Simeto

Figure 16 : Évolution de la germination au 1er jour V1 et V2 **(Photo personnelle)**.



V2 : Ammar 6 V1 : Simeto

Figure 17 : Évolution de la germination au 7ème jour V1 et V2 **(Photo personnelle)**.

- **Semis et entretien :** Le semis a été réalisé le lendemain de la préparation des pots. Douze (12) graines de blé ont été semées dans chaque pot à une profondeur homogène d'environ 2 cm .L'irrigation a été assurée à raison de deux apports par semaine. La levée a été homogène dans l'ensemble des pots. Les mauvaises herbes ont été éliminées manuellement. L'essai a été soumis aux variations climatiques naturelles et aux vents de la région**.(Figure 18)**
- **Application du traitement liquide (Jus de compost):** Au cours du cycle végétatif, aux stades clés du tallage et de la montaison, le biofertilisant liquide (*jus de compost*) a été appliqué. Ce traitement a été administré par apport direct au sol (irrigation) combiné à une pulvérisation foliaire homogène (**Figure 19**), en utilisant une dose diluée à 50 ml par litre d'eau.



Figure 18 : Semis des graines du blé dur dans les pots **(Photo personnelle)**.



Figure 19 : Application du biofertilisant liquide **(Photo personnelle)**.

Tableau 06 : Modalités et méthodes d'application des traitements.

Type de produit	Doses étudiées	Méthode et stades d'application
Biofertilisant Solide	T_1 : 1 % (10g/kg de sol soit 50g/ pot) T_2 : 3 % (30g/kg de sol soit 150g/pot)	Incorporé et mélangé de manière homogène avec le sol avant le semis.
Biofertilisant Liquide (Jus)	Dilution de 50 ml de jus concentré par litre d'eau	Irrigation au sol et pulvérisation foliaire aux stades Tallage et Montaison.

6. Paramètres étudiés

6.1. Mesure sur le sol

❖ **Caractéristiques synthétiques du profil pédologique**

Le profil a été ouvert sur une parcelle agricole de l'Université de Skikda (ex-site d'arboriculture délaissé depuis 10 ans), située sur une terrasse alluviale de faible pente près de l'Oued Zeramna.

- **Classification :** *Cumulic Haploxeroll* (Mollisols) selon l'USDA, ce qui correspond à un sol peu évolué d'apport alluvial noirci-humifère selon la classification française CPCS.
- **Propriétés physiques :** C'est un sol profond, brun foncé et compact. Sa texture est limono-argileuse en surface (32 % d'argile) et devient argilo-limoneuse en profondeur (plus de 46 % d'argile). Cette richesse en argile assure une bonne rétention en eau, mais engendre un très mauvais drainage interne avec un risque d'asphyxie racinaire.
- **Propriétés chimiques :** Le sol est marqué par un faible taux d'azote et une faible teneur en carbone organique (0,88 % à 0,72 %) dont les fluctuations en profondeur traduisent le caractère alluvial. La CEC évolue d'une valeur faible en surface à moyenne en profondeur (12,8 à 17,5 $c\,mol^{+}/kg$).

Les analyses de ce sol ont été réalisées au niveau des laboratoires de l'Université du 20 Août 1955 de Skikda. Elles ont porté sur les propriétés physiques, chimiques et hydro-structurales initiales de la couche arable superficielle (**Horizon Ap : 0 – 25 cm**) afin de caractériser la matrice brute (Sol témoin T_0) avant tout apport de biofertilisant.

Ces analyses ont englobé plusieurs paramètres essentiels (granulométrie, pH, conductivité électrique, matière organique, carbone, azote total, densité, porosité, réserve utile et CEC). La morphologie globale de ce profil pédologique est présentée dans la **figure (20)** .



Figure (20) : Photo représentative du profil.

❖ **Mesure du pH**

Le pH du sol représente son degré d'acidité ou d'alcalinité et varie généralement entre 1 et 14. Cette mesure donne également des indications sur la nature des roches ayant participé à la formation du sol. Le pH, ou potentiel hydrogène, correspond à un milieu acide lorsque les valeurs sont comprises entre 0 et 6,5, neutre à 7 et alcalin entre 7,5 et 14.

a. Matériel utilisé

Le matériel utilisé pour cette analyse comprend :

- Des échantillons de sol tamisés à 2 mm
- 10 g de sol pour chaque échantillon
- Un pH-mètre
- Des béchers de 50 ml
- Des baguettes en verre
- Une éprouvette graduée

- Un agitateur magnétique.

b. Mode opératoire

Dans un bécher de 50 ml, 10 g de terre fine ont été pesés avec une précision de 0,01 g, puis 25 ml d'eau déminéralisée ont été ajoutés. Le mélange a été agité pendant 10 minutes à l'aide d'un agitateur magnétique. La mesure du pH (H_2O) a ensuite été effectuée à l'aide du pH-mètre, en attendant la stabilisation des valeurs affichées avant de procéder à la lecture, les électrodes ne réagissant pas instantanément dans ce type de milieu.

❖ **Mesure de la conductivité électrique (CE)**

La détermination de la conductivité électrique a été réalisée suivant le même protocole expérimental utilisé pour la mesure du pH. La seule différence réside dans l'utilisation d'un conductimètre à la place du pH-mètre. Cette mesure permet d'évaluer le degré de salinité du sol.

❖ **Analyse de la matière organique**

La teneur en matière organique (MO) du sol a été déterminée par la méthode de la perte au feu. Cette méthode est généralement déconseillée pour les échantillons fortement calcaires. Son domaine d'étalonnage varie entre 1 et 50 % de matière organique.

• Mode opératoire

Pour cette analyse, les échantillons de sol ont été préalablement broyés puis tamisés à 2 mm. Le creuset vide a d'abord été pesé (M0), puis 10 g de sol séché y ont été ajoutés avant de noter le poids total obtenu. L'échantillon a ensuite été placé dans une étuve à 105 °C pendant 24 heures afin d'éliminer l'humidité. Après refroidissement dans un dessiccateur pendant environ 10 minutes, une nouvelle pesée a été effectuée (M1).

Par la suite, l'échantillon a été calciné dans un four à moufle à 250 °C pendant 4 heures. Après refroidissement dans le dessiccateur, le creuset contenant le sol calciné a été pesé (M2).

Une seconde calcination a ensuite été réalisée à 450 °C pendant 4 heures, suivie d'un refroidissement dans le dessiccateur et d'une dernière pesée du creuset (M3).

6.2. Mesure sur la plante :

• Teneur en chlorophylle

La teneur en chlorophylle des feuilles a été estimée à l'aide d'un chlorophyllomètre de type SPAD **(Figure 21)**.

Les mesures ont été réalisées sur trois feuilles de chaque pot, en effectuant trois lectures à différents endroits de chaque feuille afin d'obtenir une valeur représentative de la teneur en chlorophylle.



Figure 21 : Mesure de la teneur en chlorophylle des feuilles à l'aide d'un chlorophyllomètre SPAD (**Photo personnelle)**.

• Surface foliaire (cm²)

La surface foliaire (SF) a été déterminée selon une méthode consistant à reproduire le contour des feuilles sur du papier calque afin d'estimer leur surface.

Les feuilles ont d'abord été placées sur du papier calque, puis leurs contours ont été soigneusement tracés et découpés. Le poids du morceau de papier correspondant à la feuille (PF) a ensuite été mesuré à l'aide d'une balance de précision **(Figure 22)**.

Par ailleurs, un carré de référence de 1 cm² découpé à partir du même papier calque a également été pesé afin de déterminer le poids correspondant à une surface connue (PQ).

La surface foliaire (SF) a ensuite été calculée à l'aide de la formule suivante :

$$SF= (PF-SQ) / PQ$$



Figure 22 : Pesée du papier calque utilisé pour l'estimation de la surface foliaire (**Photo personnelle)**.

• Teneur en eau (TE %)

La teneur en eau des feuilles a été déterminée à partir de la mesure du poids frais, du poids turgide et du poids sec des échantillons foliaires.

Pour cette analyse, l'avant-dernière feuille de chaque plantule a été prélevée puis pesée directement le matin même afin de déterminer le poids frais (PF).

Par la suite, les échantillons ont été placés dans des tubes à essai contenant de l'eau distillée et maintenus pendant 24 heures afin d'obtenir le poids turgide (PT).

Après cette étape, les feuilles ont été enveloppées dans du papier aluminium puis placées dans un four à une température de 80 °C pendant 24 heures afin de déterminer le poids sec (PS). **(Figure 23)**

La teneur en eau (TE %) a ensuite été calculée à l'aide de la formule suivante :

$$TE\ (\%) = 100\times [PF\text{-}PS \div PT\text{-}PS]$$



Figure 23 : Étapes de détermination du poids frais, turgide et sec des feuilles (**Photo personnelle)**.

• Longueur de col (cm)

La longueur du col a été mesurée en centimètres, depuis la base du col jusqu'à la base de l'épi.

• Longueur de l'épi avec barbes (cm)

La longueur de l'épi avec barbes a été mesurée depuis la base de l'épi (premier article du rachis) jusqu'à l'extrémité supérieure des barbes.

• Longueur de la plante (cm)

La longueur de la plante a été mesurée à l'aide d'un ruban mètre, en prenant la distance entre le niveau du sol et le sommet de la plante.

• Nombre d'épis

Le nombre d'épis a été déterminé par comptage direct des épis formés sur chaque plante de blé dans chaque pot. Cette mesure a été réalisée à la fin du cycle de croissance, lorsque les épis étaient complètement développés et facilement identifiables. Elle permet d'évaluer le potentiel productif des plantes en fonction des différents traitements appliqués.

• Nombre de grains par épi

Le nombre de grains par épi a été déterminé par comptage manuel des grains contenus dans les épis récoltés.

• Poids de 100 grains (PCG)

Après la récolte, un échantillon de 100 grains a été prélevé dans chaque pot. Son poids a ensuite été déterminé à l'aide d'une balance de précision et exprimé en grammes (g).



Figure 24 : Détermination du poids de 100 grains à l'aide d'une balance de précision (**Photo personnelle)**.

• Rendement théorique (g/pot)

Le rendement théorique a été estimé à partir des composantes du rendement selon la formule suivante : Rendement par pot = (Nombre de plants/pot × nombre de grains/épi × poids de 100 grains) / 100

Les valeurs du nombre de grains par plante et du poids de 100 grains ont été déterminées après la récolte, puis utilisées pour le calcul du rendement théorique.

7- Analyse des données :

Afin de pouvoir caractériser les différences qui existent entre les variétés étudiées concernant les différents paramètres mesurés, nous avons calculé certains paramètres statistiques à l'aide du logiciel d'analyse et traitement statistique des données **« XL STAT version 2014 »**

Chapitre II : Résultats et Discussion

Chapitre II : Résultats et Discussion :

1- Caractéristiques physico-chimiques initiales du sol témoin

Avant d'évaluer l'impact des différents programmes de bio fertilisation sur la croissance et la productivité du blé dur (*Triticum durum* L.), il est indispensable de caractériser l'état initial du milieu pédologique d'origine. Les résultats des analyses physiques et chimiques réalisées sur le sol témoin (T_0, sol naturel non traité) sont regroupés dans le **(Tableau 07)**

Tableau 07 : Propriétés physico-chimiques de la terre témoin (T_0) avant traitement.

	Valeurs mesurées
pH (eau)	6.61
Conductivité Électrique (CE) ($\boldsymbol{\mu}$S/cm)	111.9
Matière Organique (MO %)	3.3
Carbone Organique (%)	1.88
Capacité de Rétention en Eau (%)	56
Densité Apparente ($\boldsymbol{D_a}$ g/cm³)	0.54

Les résultats analytiques du sol témoin (T_0) révèlent des propriétés agronomiques initiales favorables au développement des céréales :

- Le pH (6.61) : Proche de la neutralité à faiblement acide, ce niveau est considéré comme optimal pour l'activité microbienne. Selon Soltner (2005), un tel pH garantit une biodisponibilité maximale des éléments nutritifs majeurs (N, P, K) dans la solution du sol en évitant leur blocage chimique ou leur rétrogradation, ce qui est propice à la nutrition précoce du blé et de l'orge.
- La Conductivité Électrique (111.9 μS/cm) : Très faible, elle montre que le sol initial est totalement non salin. D'après la classification des sols de Richards (1954), une CE inférieure à 2000 μS/cm écarte tout risque de stress osmotique ou de toxicité ionique, assurant ainsi des conditions idéales lors de la phase sensible de la germination.

- La Matière Organique (3.3 %) et le Carbone (1.88 %) : Ces valeurs témoignent d'un statut organique moyen à satisfaisant pour un sol de culture. Calvet (2003) souligne que ce stock humique initial constitue non seulement un réservoir d'azote minéralisable, mais assure également la cohésion des agrégats et la stabilité structurale du sol face au compactage.
- Les propriétés physiques : La capacité de rétention en eau (56 %) indique une bonne aptitude à stocker l'humidité nécessaire pour la levée (Musy et Soutter, 1991). De plus, la faible densité apparente (0.54 g/cm³) reflète une porosité globale élevée qui, selon Gros (1979), favorise une excellente aération du substrat (faible résistance mécanique à la pénétration racinaire).

2- Effet des biofertilisants sur les caractéristiques morphologiques et la production du blé dur

2.1.Teneur relative en eau (TRE %)

D'après la **(Figure 25)**, les résultats obtenus indiquent que le taux de remplissage des épis (TRE) a augmenté chez la variété Simeto de +17,32 % sous T1 et de +33,64 % sous T2. Chez la variété Ammar 6, des augmentations de +7,77 % sous T1 et de +15,29 % sous T2 ont été enregistrées par rapport au témoin.

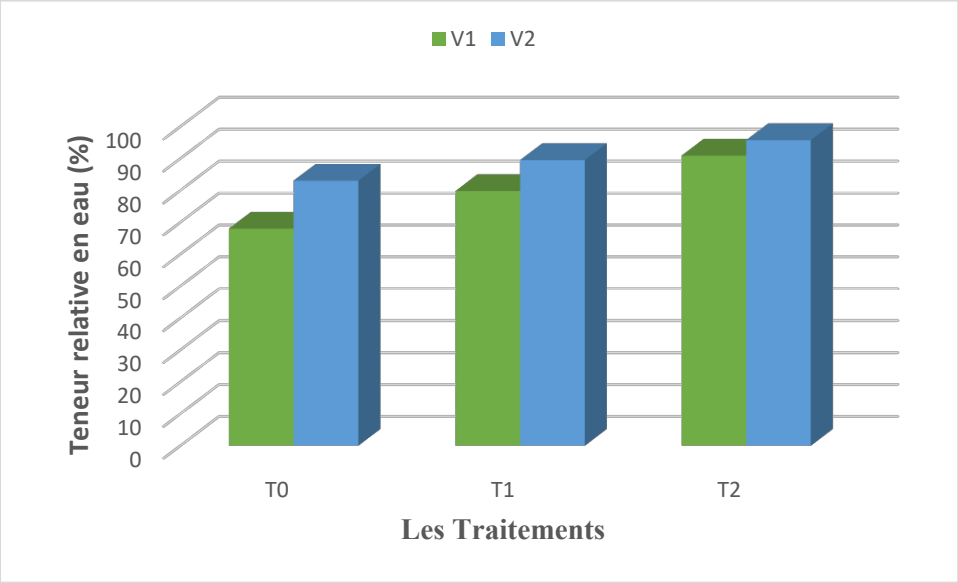


Figure 25 : Effet des différentes doses du biofertilisant sur la teneur en eau du blé dur chez les deux variétés étudiées.

L'analyse de la variance (ANOVA) de la teneur relative en eau (TRE) a révélé un effet significatif du traitement et de la variété, tandis que l'interaction traitement × variété n'était pas significative **(Annexe 01)**.

Le test de Newman-Keuls au seuil de 5 % pour le facteur traitement indique trois groupes homogènes. Le premier groupe (A) comprend le traitement T2 avec une moyenne générale de 93,32 %. Le deuxième groupe (B) correspond au traitement T1 avec une moyenne générale de 84,65 %. Enfin, le troisième groupe (C) regroupe le témoin T0 avec une moyenne générale de 75,54 %.

Le test de Newman-Keuls au seuil de 5 % pour le facteur variété indique un seul groupe homogène. Le premier groupe (A) regroupe les deux génotypes V1 et V2 avec des moyennes générales respectives de 79,57 % et 89,43 %.

- **Discussion du statut hydrique de la plante (TRE %)**

"L'élévation significative de la teneur relative en eau (TRE), particulièrement optimisée sous **le traitement T2 (150)**, démontre l'efficacité d'un apport plus dense de cet amendement à réguler l'état hydrique du blé dur. Sur le plan biophysique, la fraction poreuse du **biochar** incorporée à cette dose fonctionne comme une éponge carbonée majeure qui augmente la porosité globale et la capacité de rétention en eau (CRE) du substrat **(Glaser et al., 2002).**

De plus, la présence accrue de macromolécules d'acides humiques apportées par le **compost** et le **fumier** contribue à structurer le substrat et limite l'évaporation directe du sol **(Khaled & Fawy, 2011).** Conjointement, les solutés organiques du **jus de compost** favorisent l'ajustement osmotique et maintiennent le potentiel de turgor cellulaire, un facteur clé qui régit directement l'expansion et la stabilité hydrique des tissus foliaires chez le blé dur, préservant ainsi l'intégrité fonctionnelle des chloroplastes **(Touil (2026)."**

2.2.Surface foliaire (cm²)

D'après la **(Figure 26)**, les résultats obtenus en comparaison avec le témoin T0 montrent que, la surface foliaire (SF) a augmenté chez la variété Simeto de +12,52 % sous T1 et de +14,62 % sous T2. En revanche, chez la variété Ammar 6, une diminution de −21,55 % a été observée sous T1 et de −7,72 % sous T

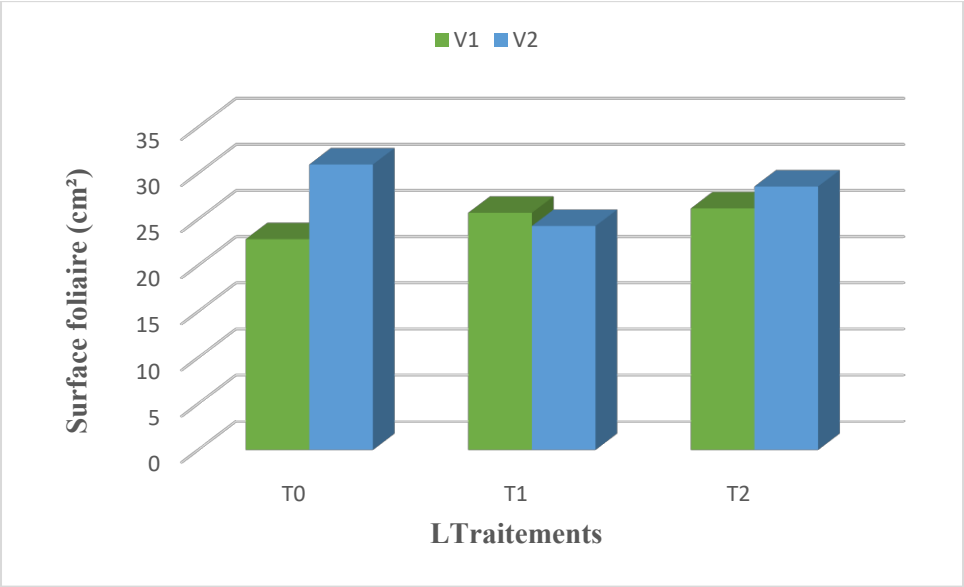


Figure 26 : Effet des différentes doses du biofertilisant sur la surface foliaire du blé dur chez les deux variétés étudiées.

L'analyse de la variance (ANOVA) de la surface foliaire (SF) n'a montré aucun effet significatif du traitement, de la variété et de leur interaction **(Annexe 02)**.

Le test de Newman-Keuls au seuil de 5 % pour le facteur traitement indique un seul groupe homogène. Le premier groupe (A) regroupe les trois traitements T0, T1 et T2 avec des moyennes générales respectives de 26,90 cm², 24,99 cm² et 27,36 cm²

Le test de Newman-Keuls au seuil de 5 % pour le facteur variété indique un seul groupe homogène. Le premier groupe (A) regroupe les deux génotypes V1 et V2 avec des moyennes générales respectives de 24,92 cm² et 27,93 cm²

- **Discussion de la surface foliaire (SF)**

L'expansion remarquable de la surface foliaire (SF) chez le blé dur montre une dynamique ascendante liée à l'augmentation de la dose du biofertilisant. Le développement maximal du limbe foliaire enregistré sous **le traitement T2 (150)** par rapport au **traitement T1 (50)** est attribué à la libération progressive des nutriments par la matrice du **compost** et du **fumier** (Khaled & Fawy, 2011).

Sur le plan physiologique, ce flux nutritionnel soutenu stimule l'initiation et l'expansion cellulaire des feuilles tout en retardant leur sénescence, ce qui maximise l'interception du rayonnement photosynthétiquement actif. De plus, l'incorporation du biochar à la dose 150

améliore la porosité et la capacité de rétention en eau du substrat (Glaser et al., 2002). Ce réseau hydrique stable, couplé aux solutés humiques du jus de compost, maintient la pression de turgor cellulaire, garantissant ainsi une expansion optimale de la surface foliaire chez les deux variétés, en accord avec les travaux de **Aboelsoud et Ahmed (2020)** et **Touil (2026)**."

2.3.Teneur en chlorophylle

La **(Figure 27)** met en évidence une augmentation de la teneur en chlorophylle (CHLO) par rapport au témoin T0, avec +1,28 % sous T1 et +12,99 % sous T2 chez la variété Simeto, et +3,06 % sous T1 et +13,76 % sous T2 chez la variété Ammar 6.

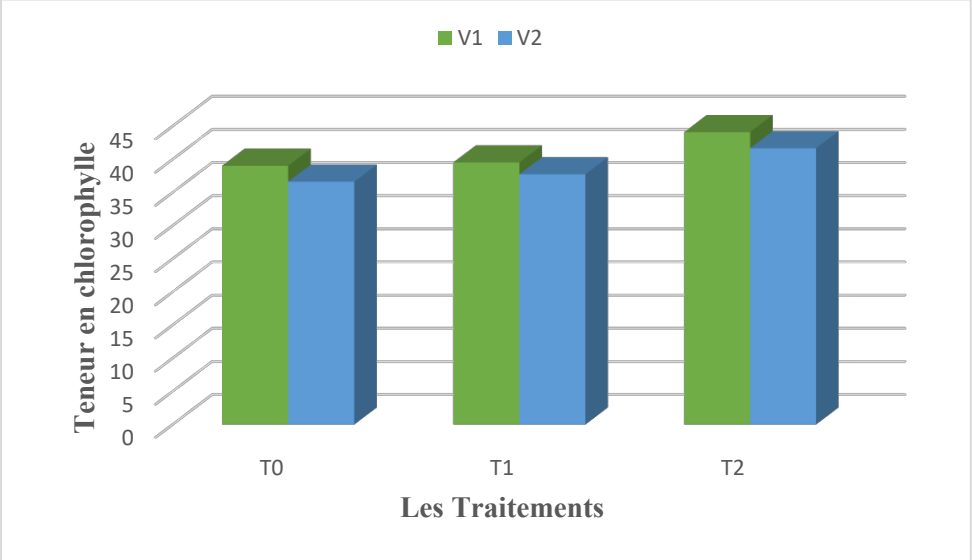


Figure 27 : Effet des différentes doses du biofertilisant sur la chlorophylle du blé dur chez les deux variétés étudiées.

L'analyse de la variance (ANOVA) de la teneur en chlorophylle (CHLO) a montré un effet hautement significatif du traitement et un effet significatif de la variété, tandis que l'interaction traitement × variété n'était pas significative **(Annexe 03)**.

Le test de Newman-Keuls au seuil de 5 % pour le facteur traitement indique deux groupes homogènes. Le premier groupe (A) comprend le traitement T2 avec une moyenne générale de 42,88. Le deuxième groupe (B) regroupe les traitements T1 et T0 avec des moyennes générales respectives de 38,64 et 37,83.

Le test de Newman-Keuls au seuil de 5 % pour le facteur variété indique deux groupes homogènes distincts. Le premier groupe (A) porte le génotype V1 avec une moyenne générale de 40,89. Le deuxième groupe (B) porte le génotype V2 avec une moyenne générale de 38,68.

❖ **Discussion de la teneur en chlorophylle (CHLO)**

L'élévation de la teneur en chlorophylle chez le blé dur sous le traitement optimal **T2 (150)** s'explique par la richesse du milieu racinaire en éléments minéraux essentiels apportés par le complexe organique. L'apport dense de **compost** et de **fumier**, combiné aux arrosages par le **jus de compost**, assure une excellente biodisponibilité du magnésium (atome central de la molécule de chlorophylle), de l'azote et du fer **(Khaled & Fawy, 2011).**

L'absorption active de ces éléments suractive les enzymes clés de la biosynthèse des pigments photosynthétiques. Ce statut nutritionnel optimal préserve l'intégrité fonctionnelle des chloroplastes et prolonge l'activité photosynthétique des feuilles (effet *stay-green*), ce qui corrobore les conclusions de **Aboelsoud et Ahmed (2020)** et s'accorde avec les mécanismes de persistance verte décrits par **Touil (2026)**

2.4. Longueur de tige (Cm)

Comme le présente la **(Figure 28)**, la longueur de la tige (LT) augmente par rapport au témoin T0 chez les deux variétés, avec +12,35 % et +15,00 % sous T1 et T2 chez Simeto, et +12,05 % et +27,50 % chez Ammar 6.

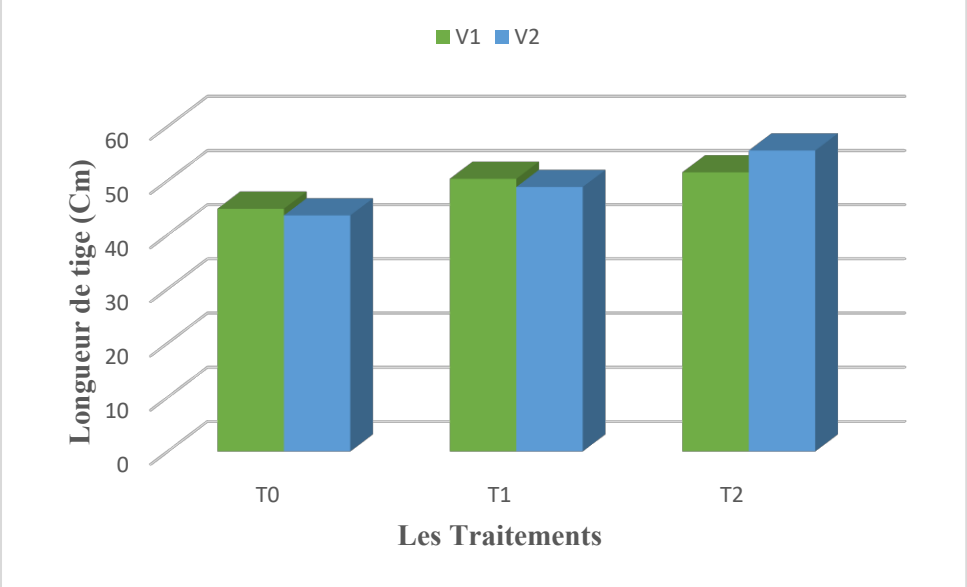


Figure 28 : Effet des différentes doses du biofertilisant sur la longueur de tige du blé dur chez les deux variétés étudiées.

L'analyse de la variance (ANOVA) de la longueur de la tige (LT) a montré un effet hautement significatif du traitement, tandis que l'effet de la variété et l'interaction traitement × variété n'étaient pas significatifs **(Annexe 04)**.

Le test de Newman-Keuls au seuil de 5 % pour le facteur traitement indique trois groupes homogènes distincts. Le premier groupe (A) comprend le traitement T2 avec une moyenne générale de 53,53 cm. Le deuxième groupe (B) correspond au traitement T1 avec une moyenne générale de 49,56 cm. Enfin, le troisième groupe (C) regroupe le témoin T0 avec une moyenne générale de 44,17 cm.

Le test de Newman-Keuls au seuil de 5 % pour le facteur variété indique un seul groupe homogène. Le premier groupe (A) regroupe les deux variétés V1 et V2 avec des moyennes générales respectives de 48,87 cm et 49,30 cm

❖ **Discussion de la longueur de la tige (LT)**

L'allongement progressif et significatif de la tige (LT) chez le blé dur traduit une réponse dose-dépendante positive face aux niveaux de fertilisation appliqués. L'optimisation maximale de ce paramètre morphologique sous **le traitement T2 (150)** par rapport au **traitement T1 (50)** s'explique par **l'action combinée** des fractions solide et liquide de ce complexe organique (**Biochar + Compost + Fumier + Jus de compost**).

En effet, la concentration élevée de 150 assure une biodisponibilité accrue et synchrone des éléments nutritifs essentiels, notamment l'azote (N), le phosphore (P) et le potassium (K) (Khaled & Fawy, 2011). Sur le plan physiologique, l'assimilation continue de l'azote stimule activement la division et l'élongation cellulaire au niveau des méristèmes caulinaires du blé, ce qui induit une élongation internodale supérieure.

Cette performance de croissance est fortement consolidée par l'apport régulier du **jus de compost**, qui protège les tissus en croissance contre les micro-stress hydriques et soutient la vigueur végétative initiale de la tige, ce qui s'aligne parfaitement avec les observations de **Aboelsoud et Ahmed (2020)** et les conclusions locales de **Touil (2026)**."

2.5. Longueur de l'épi avec barbe (Cm)

L'analyse de la **(Figure 29)** révèle que, par rapport au témoin T0, la longueur de l'épi avec barbe a augmenté chez la variété Simeto de +10,39 % sous T1 et de +17,85 % sous T2. Chez la

variété Ammar 6, une augmentation de +6,06 % sous T1 et de +18,58 % sous T2 a également été observée

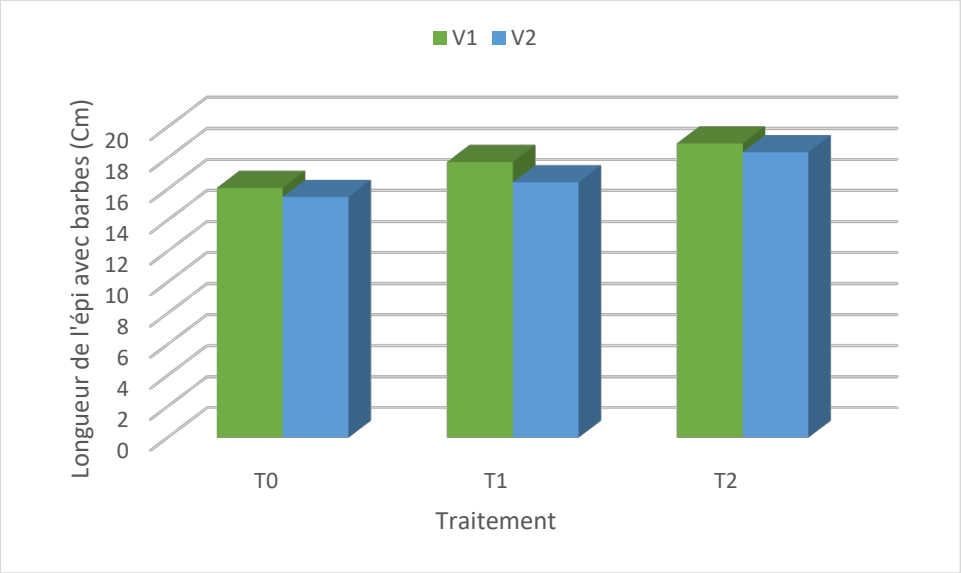


Figure 29 : Effet des différentes doses du biofertilisant sur la longueur de l'épi avec barbe chez les deux variétés étudiées.

L'analyse de la variance (ANOVA) de la longueur de l'épi avec barbe (LEB) a révélé un effet significatif du traitement, tandis que les effets de la variété et de l'interaction n'étaient pas significatifs **(Annexe 05)**.

Le test de Newman-Keuls au seuil de 5 % pour le facteur traitement indique deux groupes homogènes. Le premier groupe (A) comprend le traitement T2 avec une moyenne générale de 18,66 cm. Le deuxième groupe (B) regroupe les traitements T1 et T0 avec des moyennes générales respectives de 17,10 cm et 15,79 cm.

Le test de Newman-Keuls au seuil de 5 % pour le facteur variété indique un seul groupe homogène. Le premier groupe (A) regroupe les deux variétés V1 et V2 avec des moyennes générales respectives de 17,59 cm et 16,77 cm.

- **Discussion de la longueur de l'épi**

"La longueur de l'épi constitue une composante structurale déterminante du rendement chez le blé dur, car elle conditionne directement l'espace disponible pour l'initiation des épillets. L'augmentation de ce paramètre, maximisée sous **le traitement T2 (150)**, démontre que la dose élevée de ce complexe organique fournit une nutrition phosphorée et azotée optimale au moment de l'initiation florale **(Steiner et al., 2007).**

En effet, le phosphore (*P*) et le potassium (*K*) libérés progressivement par le **compost** et le **fumier** (Khaled & Fawy, 2011), couplés aux propriétés d'échange cationique du **biochar** (Glaser et al., 2002), stimulent le développement de l'axe principal de l'épi (le rachis).

De plus, sur le plan statistique, l'absence d'effet significatif du facteur variété et de l'interaction (V × T) sur la longueur de l'épi confirme que les deux variétés de blé dur ont valorisé de manière identique cette formule fertilisante, ce qui corrobore les conclusions de **Brahmia et Klai** quant à l'homogénéité du comportement morphologique des variétés de blé dur face aux régimes de fertilisation."

2.6. Longueur du col (Cm)

La **(Figure 30)** illustre clairement que, par rapport au témoin T0, la longueur du col a augmenté chez la variété Simeto de +2,64 % sous T1 et de +12,76 % sous T2. Chez la variété Ammar 6, des augmentations plus importantes ont été enregistrées, atteignant +74,18 % sous T1 et +36,30 % sous T2.

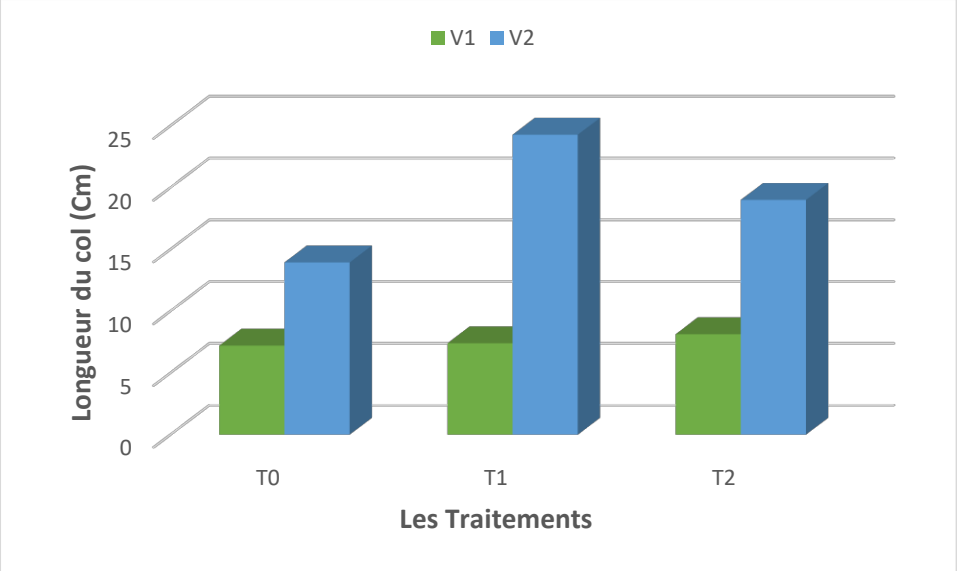


Figure 30 : Effet des différentes doses du biofertilisant sur la longueur du col chez les deux variétés étudiées.

L'analyse de la variance (ANOVA) de la longueur du col a montré un effet significatif du traitement et un effet hautement significatif de la variété, tandis que l'interaction n'était pas significative **(Annexe 06)**.

Le test de Newman-Keuls au seuil de 5 % pour le facteur traitement indique deux groupes homogènes. Le premier groupe (A) comprend le traitement T2 avec une moyenne générale de 13,56 cm. Le deuxième groupe (B) regroupe les traitements T1 et T0 avec des moyennes générales respectives de 11,43 cm et 10,58 cm.

Le test de Newman-Keuls au seuil de 5 % pour le facteur variété indique deux groupes homogènes distincts. Le premier groupe (A) porte le génotype V2 avec une moyenne générale de 16,13 cm. Le deuxième groupe (B) porte le génotype V1 avec une moyenne générale de 7,58 cm.

❖ **Discussion de la longueur du col de l'épi**

"L'allongement significatif du col de l'épi chez le blé dur sous **le traitement T2 (150)** par rapport au **traitement T1 (50)** reflète une optimisation de la phase végétative tardive juste avant l'épiaison. Sur le plan physiologique, le col de l'épi est le dernier entre-nœud à se développer ; sa croissance dépend étroitement de la disponibilité en azote (N) et en carbone durant les stades terminaux de la montaison (Khaled & Fawy, 2011).

L'apport soutenu de nutriments via la matrice solide (**biochar + compost + fumier**) potentialisé par les arrosages au **jus de compost** stimule l'activité méristématique de cet entre-nœud supérieur. Un col de l'épi plus long est un indicateur agronomique majeur, car il augmente la distance entre la dernière feuille (feuille étendard) et la senescence potentielle de la base, tout en améliorant la capacité de stockage et de transfert ultérieur des assimilats vers l'épi, ce qui s'accorde avec les observations de **Aboelsoud et Ahmed (2020)** et les résultats locaux de **Touil (2026)**."

2.7. Nombre d'épis

En se référant à la **(Figure 31)**, il est observé que, par rapport au témoin T0, le nombre d'épis a diminué chez la variété Simeto de −5,66 % sous T1 et de −17,15 % sous T2. En revanche, chez la variété Ammar 6, une augmentation de +33,29 % a été enregistrée sous T1 et de +14,29 % sous T2.

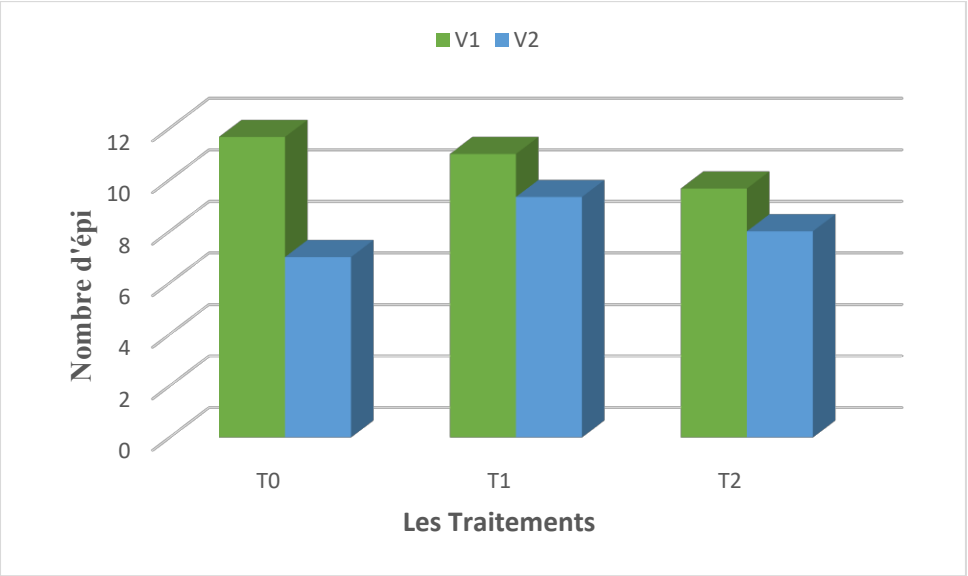


Figure 31 : Effet des différentes doses du biofertilisant sur le nombre d'épi chez les deux variétés étudiées.

L'analyse de la variance (ANOVA) du nombre d'épis a montré un effet hautement significatif de la variété, tandis que les effets du traitement et de l'interaction n'étaient pas significatifs **(Annexe 07)**.

Le test de Newman-Keuls au seuil de 5 % pour le facteur traitement indique un seul groupe homogène. Le premier groupe (A) regroupe les trois traitements T0, T1 et T2 avec des moyennes générales respectives de 9,33, 10,17 et 8,83. »

Le test de Newman-Keuls au seuil de 5 % pour le facteur variété indique deux groupes homogènes distincts. Le premier groupe (A) porte le génotype V1 avec une moyenne générale de 10,79. Le deuxième groupe (B) porte le génotype V2 avec une moyenne générale de 8,11.

2.8. Nombre de grains par épi

En se référant à la **(Figure 32)**, il est observé que, par rapport au témoin T0, le nombre de grains par épi a augmenté chez la variété Simeto de +18,86 % sous T1 et de +47,85 % sous T2. Chez la variété Ammar 6, une augmentation de +32,42 % a été enregistrée sous T1 et de +67,93 % sous T2

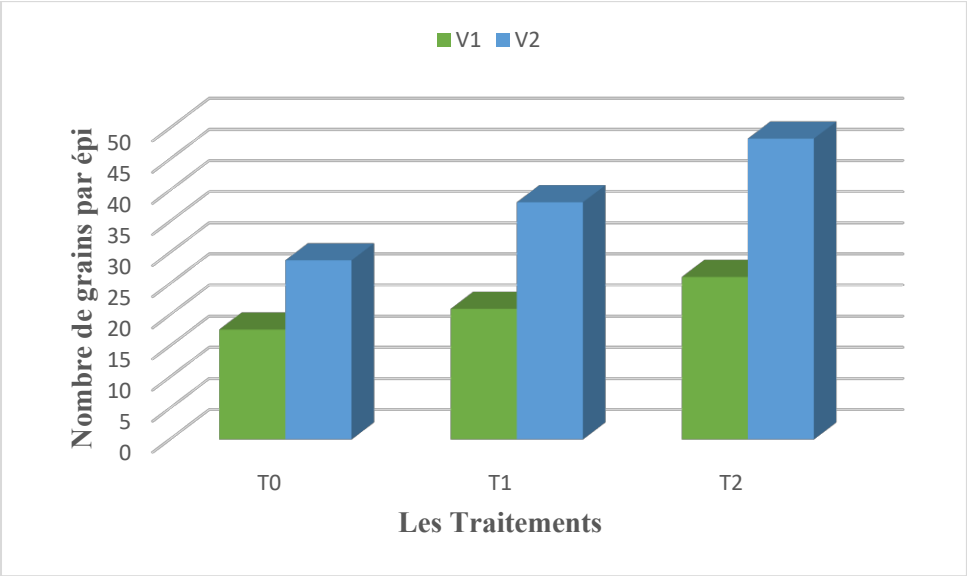


Figure 32 : Effet des différentes doses du biofertilisant sur le nombre de grains par épi chez les deux variétés étudiées.

L'analyse de la variance (ANOVA) du nombre de grains par épi a montré un effet significatif du traitement et un effet hautement significatif de la variété **(Annexe 08)**.

Le test de Newman-Keuls au seuil de 5 % pour le facteur traitement indique trois groupes homogènes distincts. Le premier groupe (A) comprend le traitement T2 avec une moyenne générale de 37,22. Le deuxième groupe (B) correspond au traitement T1 avec une moyenne générale de 29,55. Enfin, le troisième groupe (C) regroupe le témoin T0 avec une moyenne générale de 23,22.

Le test de Newman-Keuls au seuil de 5 % pour le facteur variété indique deux groupes homogènes distincts. Le premier groupe (A) porte le génotype V2 avec une moyenne générale de 38,40. Le deuxième groupe (B) porte le génotype V1 avec une moyenne générale de 21,59.

2.9. Poids de 100 grains (g)

Les données présentées dans la **(Figure 33)** indiquent que, par rapport au témoin, le poids de 100 grains a augmenté chez la variété Simeto de +3,05 % sous T1 et de +2,88 % sous T2. En revanche, chez la variété Ammar 6, une diminution de −3,87 % a été enregistrée sous T1, tandis que T2 n'a entraîné aucune variation.

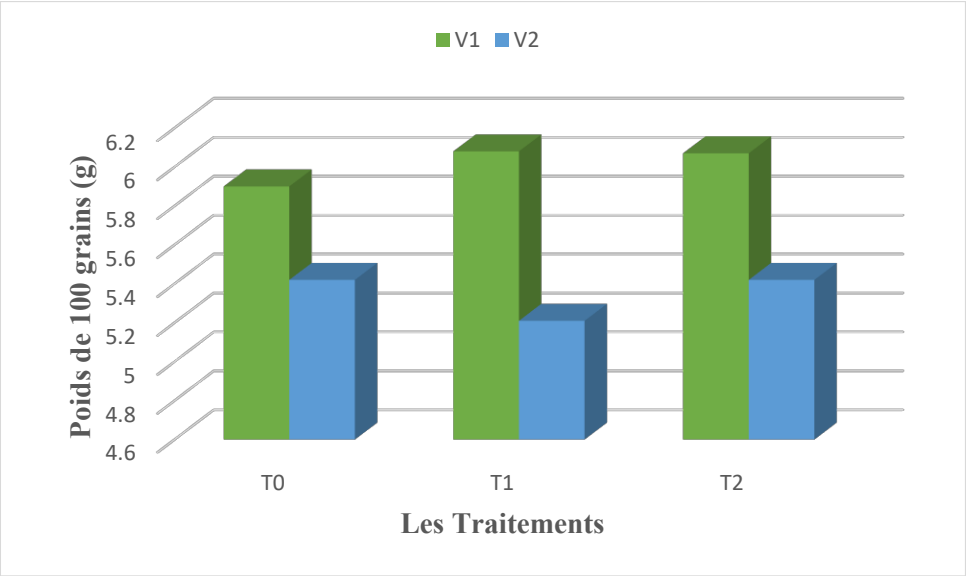


Figure 33 : Effet des différentes doses du biofertilisant sur le poids de 100 grains chez les deux variétés étudiées.

L'analyse de la variance (ANOVA) du poids de cent grains (PCG) a montré un effet significatif de la variété, tandis que les effets du traitement et de l'interaction n'étaient pas significatifs **(Annexe 09)**.

Le test de Newman-Keuls au seuil de 5 % pour le facteur traitement indique un seul groupe homogène. Le premier groupe (A) regroupe les trois traitements T0, T1 et T2 avec des moyennes générales respectives de 5,66 g, 5,65 g et 5,75 g.

Le test de Newman-Keuls au seuil de 5 % pour le facteur variété indique deux groupes homogènes distincts. Le premier groupe (A) porte le génotype V1 avec une moyenne générale de 6,02 g. Le deuxième groupe (B) porte le génotype V2 avec une moyenne générale de 5,35 g.

2.10. Rendement théorique (g/pot)

Selon la **(Figure 34)**, on constate que, par rapport au témoin T0, le rendement a augmenté chez la variété Simeto de +17,72 % sous T1 et de +24,15 % sous T2. Chez la variété Ammar 6, les augmentations observées ont été plus importantes, atteignant +69,00 % sous T1 et +90,64 % sous T2.

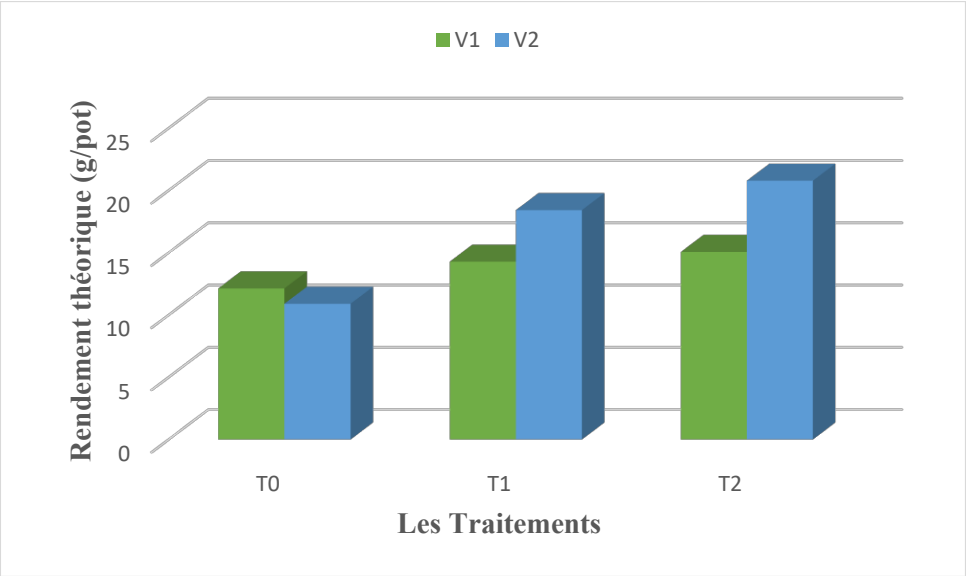


Figure 34 : Effet des différentes doses du biofertilisant sur le rendement en grains chez les deux variétés étudiées.

L'analyse de la variance (ANOVA) du rendement a montré un effet significatif du traitement, tandis que la variété et l'interaction n'étaient pas significatives **(Annexe 10)**.

Le test de Newman-Keuls au seuil de 5 % pour le facteur traitement indique deux groupes homogènes. Le premier groupe (A) regroupe les traitements T1 et T2 avec des moyennes générales respectives de 16,35 g/pot et 17,92 g/pot. Le deuxième groupe (B) comprend le témoin T0 avec une moyenne générale de 11,52 g/pot.

Le test de Newman-Keuls au seuil de 5 % pour le facteur variété indique un seul groupe homogène. Le premier groupe (A) regroupe les deux variétés V1 et V2 avec des moyennes générales respectives de 13,83 g/pot et 16,70 g/pot.

❖ Discussion globale des composantes du rendement et de la productivité

"L'augmentation substantielle du rendement théorique en grains par pot, maximisée sous **le traitement T2 (150)** chez les deux variétés de blé dur, confirme la performance agronomique et la capacité de cette céréale à valoriser les doses élevées de cette formule de fertilisation intégrée (**Biochar + Compost + Fumier + Jus de compost**). Le blé dur valorise efficacement la concentration de 150, ce qui s'est traduit par une amélioration synchrone des composantes du rendement (longueur de l'épi, nombre de grains par épi et poids des grains). Cette réponse

positive s'aligne avec les conclusions de **Aboelsoud et Ahmed (2020)**, qui ont démontré que l'amendement par le biochar et les matières organiques optimise la productivité du blé dur et améliore le poids final des grains grâce à l'optimisation de la rétention en eau et des nutriments (Glaser et al., 2002 ; Khaled & Fawy, 2011).

Sur le plan physiologique, **l'effet synergique** de ce système garantit un flux carboné et nutritionnel continu vers les pièces florales au moment de l'anthèse, ce qui réduit significativement l'avortement des floscules (Steiner et al., 2007). La prolongation de la translocation des photosynthétats depuis la source (feuilles) vers les puits (grains) optimise le nombre et le poids final des grains.

De plus, sur le plan statistique, l'absence d'effet significatif du facteur variété et de l'interaction (V × T) sur le rendement corrobore parfaitement les observations de **Brahmia et Klai** sur le blé dur, qui ont également rapporté un comportement agronomique similaire entre différentes variétés face aux régimes de fertilisation azotée et organique. Ces résultats confirment l'existence d'une dynamique pédo-végétale continue capable de maximiser la productivité du blé dur en milieu confiné (Touil, 2026)."

CONCLUSION

Conclusion générale

Cette étude s'inscrit dans le cadre de la valorisation et du développement des techniques de fertilisation durable, comme alternative biologique pour soutenir les intrants chimiques dans les systèmes céréaliers. L'expérimentation a été conduite en pots sous serre et au laboratoire d'agronomie de la Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie de l'Université du 20 Août 1955 à Skikda, durant l'année académique 2025-2026. Ce travail, intitulé **« Comparaison de la réponse du blé dur (*Triticum durum* L.) à l'application d'un biofertilisant amélioré »**, avait pour objectif principal d'évaluer et de comparer l'impact d'un biofertilisant organique solide amélioré, combiné à une application complémentaire de biofertilisant liquide (jus de compost), sur la stimulation de la croissance et de la productivité de deux variétés de blé dur : la variété « Simeto » et la variété « Ammar 6 ». Le protocole expérimental a reposé sur la comparaison de trois milieux pédologiques générés par des doses croissantes de ce biofertilisant : un traitement témoin sur sol naturel non traité ($T0 = 0$ g), un premier traitement à une dose de 50 g soit 1% ($T1$) et un traitement maximal à une dose de 150 g soit 3% ($T2$).

Dans le cadre de ce travail, nous avons effectué des analyses rigoureuses sur le sol et sur la plante, et les résultats obtenus sont les suivants :

Concernant les analyses du sol, qui ont été réalisées exclusivement sur le sol témoin initial non traité ($T0$) afin de caractériser le milieu d'origine, les résultats ont révélé des propriétés agronomiques favorables au développement des céréales, se traduisant par un pH proche de la neutralité de 6,61, une conductivité électrique très faible de 111,9 μS/cm, un taux de matière organique de 3,3 %, un carbone organique de 1,88 %, une capacité de rétention en eau de 56 % et une densité apparente de 0,54 g/cm^3.

Concernant les analyses de la plante, les résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) ont mis en évidence des réponses morpho-physiologiques et des composantes de rendement hautement significatives sous l'effet des facteurs étudiés. Pour les paramètres de croissance et de physiologie, l'application du traitement maximal ($T2$) a stimulé de manière optimale le développement végétatif en enregistrant les valeurs les plus élevées pour la longueur de la tige (53,53 cm), la longueur de l'épi avec barbe (18,66 cm), l'indice de chlorophylle (42,88) et la teneur relative en eau (93,32%),

confirmant l'efficacité de ce programme de biofertilisation. Sur le plan génétique, la longueur du col de l'épi a montré une variation variétale hautement significative, le blé dur « Ammar 6 » (V2) affichant une moyenne supérieure (16,13 cm) et une réponse spectaculaire sous le traitement $T1$. Pour le nombre d'épis et le poids de 100 grains, l'analyse a montré un effet variétal hautement significatif en faveur de la variété « Simeto » (V1), confirmant que ces traits restent fortement verrouillés par le patrimoine génétique du génotype.

Pour les paramètres de productivité, le traitement maximal ($T2$) a permis de maximiser le potentiel productif des cultures en enregistrant un rendement final théorique moyen remarquable de 17,92 g/pot, suivi par le traitement $T1$ avec 16,35 g/pot, alors que le témoin $T0$ a marqué la valeur la plus faible avec 11,25 g/pot. Cette performance s'est également accompagnée d'une augmentation significative du nombre de grains par épi, atteignant une moyenne de 37,22 grains sous $T2$, avec une hausse remarquable de +90,64 % du rendement chez la variété Ammar 6 sous l'effet de cette même dose. Enfin, l'interaction statistique entre le génotype et le traitement s'est révélée non significative pour le rendement final, confirmant une réponse positive globale et uniforme des deux variétés de blé dur vis-à-vis de ce programme de biofertilisation.

En résumé, l'utilisation conjointe de ce biofertilisant organique solide et du jus de compost s'avère une solution technologique très prometteuse pour valoriser la croissance des cultures céréalières et maximiser le rendement final, offrant ainsi une alternative écologique viable pour une agriculture durable en zones semi-arides.

Sur la base de ces résultats scientifiques prometteurs, cette étude ouvre des perspectives prometteuses et suggère les orientations futures suivantes :

- Évaluation de ce programme de biofertilisation en plein champ sous conditions réelles et stress environnementaux (sécheresse, salinité).
- Étude de l'effet résiduel de ces apports organiques sur la fertilité biologique, physique et chimique du sol à long terme.
- Test de ce programme sur d'autres variétés locales ou lignées avancées de blé dur pour identifier les génotypes les plus efficients.

Conclusion Générale

- Évaluation de la rentabilité économique et du rapport coût/bénéfice de cette pratique par rapport aux engrais chimiques conventionnels.

Références Bibliographiques

Références bibliographiques

A

Abeledo, L. G., Savin, R., & Slafer, G. A. (2008). Wheat productivity in the Mediterranean Ebro Valley: Analyzing the gap between attainable and potential yield with a simulation model. *European Journal of Agronomy, 28*(4), 541–550.

ADDEN, A. K. (2004). *Évaluation quantitative du compost de biomasses diverses et leur phytotoxicité* (Mémoire de maîtrise). Université de Lomé, Togo.

Ait-El-Mokhtar, M., Laouane, R. B., Anli, M., Boutasknit, A., Wahbi, S., & Meddich, A. (2022). Use of biofertilizers to mitigate climate change effects and modulate the hydric status, stomatal conductance, and root water uptake in durum wheat (*Triticum durum* L.). *Journal of Plant Growth Regulation, 41*(3), 1215–1230.

Atieno, M., Herrmann, L., Nguyen, H. T., Phan, H. T., Nguyen, N. K., Srean, P., & Lesueur, D. (2020). Evaluation of biofertilizers for sustainable agriculture in the Greater Mekong region. *Journal of Environmental Management, 275*, 111300.

B

Bhardwaj, D., Ansari, M. W., Sahoo, R. K., & Tuteja, N. (2014). Biofertilizers function as key player in sustainable agriculture by improving soil fertility, plant growth, and crop yield. *Microbial Cell Factories*, 13(1), 66.

Bhattacharjee, R., & Dey, U. (2014). Biofertilizers, a way towards sustainable agriculture: A review. *African Journal of Microbiology Research*, 8(11), 1115-1121.

Brahmia, Z., & Klai, S. (2024). *Comportement agronomique et rendement de quelques variétés de blé dur sous différents régimes de fertilisation* (Mémoire de Master). Université 20 Août 1955 Skikda, Algéri

C

C.N.C.C. (2016). *Centre national de contrôle des céréales*.

Calvet, R. (2003). *Le sol : propriétés et fonctions*. France Agricole Éditions.

.

D

Duplessis, J. (2002). *Le compostage facilité : Guide sur le compostage domestique*. NOVA Envirocom, Québec.

Références bibliographiques

E

El-Hendawy, S., Alsamin, B., Mohammed, N., & Refay, Y. (2023). Improving morpho-physiological indicators, yield, and water productivity of wheat through an optimal combination of mulching and planting patterns in arid farming systems. *Agronomy, 13*(6), 1660.

Elliott, E. T. (1986). Aggregate structure and carbon dynamics.

F

FAO. (2014). *Crop residues and agro-industrial by-products in West Africa*. FAO, Rome.

Feillet, P. (2000). *Le grain de blé : Composition et utilisation*. INRA, Paris.

Feldman, M., & Sears, E. R. (1981). The wild gene resources of wheat. *Scientific American, 244*(1), 102–113.

G

Gadaleta, A., Lacolla, G., Giove, S. L., Fortunato, S., Nigro, D., Mastro, M. A., & Vita, F. (2022). Durum wheat response to organic and mineral fertilization with application of different levels and types of phosphorus-based fertilizers. *Agronomy, 12*(8), 1861.

Gamal, A. E.-B. M., & El-Miniawy, M. S. (2018). Effect of split application of different N rates on productivity and nitrogen use efficiency of bread wheat. *Agriculture & Food Security, 7*(1), 52.

Glaser, B., Lehmann, J., & Zech, W. (2002). Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal – A review. *Biology and Fertility of Soils, 35*, 219–230.

K

Kalia, A., Sharma, S. P., Kaur, S., & Kaur, H. (2020). Inoculants bactériens et santé des sols. In B. Giri & A. Varma (Eds.), *Soil Health* (pp. 337–373). Springer.

Khaled, A., & Fawy, H. A. (2011). Effect of different levels of humic acids on the nutrient content, plant growth, and soil properties. *German Journal of Plant Nutrition*, 1(1), 1-8.

L

M

Références bibliographiques

Mouellef, A. (2010). *Caractères physiologiques et biochimiques de tolérance du blé dur (Triticum durum Desf.) au stress hydrique* (Mémoire de Magister). Université Constantine.

Musy, A., & Soutter, M. (1991). *Physique du sol*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.

O

Ouanzar, S. (2012). *Origine et domestication des céréales dans le Bassin Méditerranéen* (Thèse de Doctorat). Université d'Alger, Algérie.

P

Pravin, V., Rosazlin, A., Tumirah, K., Salmah, I., & Amru, N. B. (2016). Role of plant growth promoting rhizobacteria in agricultural sustainability—A review. *Molecules, 21*(5).

R

Ruel, M. (2006). *L'épopée du blé: de la préhistoire à nos jours*. Éditions l'Harmattan.

S

Ivasakthi, S., Usharani, G., & Saranraj, P. (2014). Biocontrol potentiality of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) - A review. *African Journal of Microbiology Research*, 9(16), 1265-1270.

Soltner, D. (2005). *Les bases de la production végétale. Tome I : Le sol et son amélioration*. Sciences et Techniques Agricoles.

Steiner, C., Teixeira, W. G., Lehmann, J., Nehls, T., de Macêdo, J. L. V., Blum, W. E., & Zech, W. (2007). Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. *Plant and Soil*, 291(1-2), 275-290.

Suhag, M. (2016). Potential of biofertilizers to replace chemical fertilizers. *International Journal of Environmental Science*, 7(1), 44-53.

T

Touil, I. (2025). Application de biochar, d'engrais vert et de compost comme amendements organiques pour améliorer la fertilité du sol et la productivité du blé (Mémoire de Master). Université 20 Août 1955 de Skikda, Algérie.

Références bibliographiques

V

Vaccari, F. P., Baronti, S., Lugato, E., Genesio, L., Castaldi, S., Fornasier, F., & Miglietta, F. (2011). Biochar as a strategy to sequester carbon and increase yield in durum wheat. *European Journal of Agronomy, 34*(4), 231–238..

Van Zwieten, L., Kimber, S., Morris, S., Chan, K. Y., Downie, A., Rust, J., & Lukas, J. (2010). Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant and Soil*, 327(1), 235-246.

Y

Yagmur, M., & Kaydan, D. (2009). The effects of different sowing depth on grain yield and some yield components in wheat cultivars under dryland conditions. *African Journal of Biotechnology, 8*(2).

Yves Henry, & De Buyser, J. (2000). L'origine des blés. *Pour la Science*, Hors-série n° 26, 60–62.

Z

Zadoks, J. C., Chang, T. T., & Konzak, C. F. (2024). A scale and code for the growth stages of cereals (BBCH scale). *Journal of Agricultural Science, 162*(4), 401–411.

Annexes

Annexes

Tableaux des Annexes

Annexe 1:Analyse de la variance (ANOVA) de la Teneur relative en eau

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
TRAIT	2	949,467	474,733	12,610	0,001
VAR	1	437,390	437,390	11,618	0,005
TRAIT*VAR	2	77,730	38,865	1,032	0,386

Annexe 2:Analyse de la variance (ANOVA) de la Surface foliaire

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
TRAIT	2	19,048	9,524	0,600	0,565
VAR	1	40,891	40,891	2,575	0,135
TRAIT*VAR	2	68,983	34,492	2,172	0,157

Annexe 3 :Analyse de la variance (ANOVA) de la Teneur en chlorophylle

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
TRAIT	2	88,295	44,148	25,929	< 0,0001
VAR	1	21,890	21,890	12,857	0,004
TRAIT*VAR	2	0,402	0,201	0,118	0,890

Annexe 4:Analyse de la variance (ANOVA) de la Longueur de tige

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
TRAIT	2	264,392	132,196	23,615	< 0,0001
VAR	1	0,841	0,841	0,150	0,705
TRAIT*VAR	2	29,130	14,565	2,602	0,115

Annexe 5 :Analyse de la variance (ANOVA) de la Longueur de l'épi avec barbe

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
TRAIT	2	24,921	12,461	11,483	0,002
VAR	1	3,050	3,050	2,811	0,119
TRAIT*VAR	2	0,540	0,270	0,249	0,784

Annexes

Annexe 6 :Analyse de la variance (ANOVA) de la Longueur du col

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
TRAIT	2	28,450	14,225	7,968	0,006
VAR	1	329,132	329,132	184,363	< 0,0001
TRAIT*VAR	2	13,394	6,697	3,751	0,054

Annexe 7 :Analyse de la variance (ANOVA) du Nombre d'épi

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
TRAIT	2	5,444	2,722	2,333	0,139
VAR	1	32,000	32,000	27,429	0,000
TRAIT*VAR	2	9,000	4,500	3,857	0,051

Annexe 8 :Analyse de la variance (ANOVA) Nombre du grains par épi

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
TRAIT	2	589,651	294,826	12,152	0,001
VAR	1	1272,601	1272,601	52,453	< 0,0001
TRAIT*VAR	2	92,772	46,386	1,912	0,190

Annexe 9 :Analyse de la variance (ANOVA) du Poids de 100 grains

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
TRAIT	2	0,035	0,018	0,174	0,842
VAR	1	1,993	1,993	19,612	0,001
TRAIT*VAR	2	0,113	0,057	0,557	0,587

Annexe 10 :Analyse de la variance (ANOVA) pour Rendement théorique

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
TRAIT	2	133,636	66,818	7,981	0,006
VAR	1	37,210	37,210	4,444	0,057
TRAIT*VAR	2	39,789	19,895	2,376	0,135

Charim Ahlem **Boudemagh Chaima** **Bounemra Maissa**

Titre: Comparaison de la réponse du blé dur (*Triticum durum* L.) à l'application d'un biofertilisant amélioré

Mémoire de fin de cycle pour l'obtention du diplôme de Master en Amélioration des plantes.

Cette étude s'inscrit dans le cadre de la valorisation et du développement des techniques de fertilisation durable, comme alternative biologique aux intrants chimiques dans les systèmes céréaliers. L'objectif principal était d'évaluer et de comparer l'impact d'un biofertilisant organique solide amélioré, combiné à une application complémentaire de biofertilisant liquide (jus de compost), sur la stimulation de la croissance et de la productivité de deux variétés de blé dur (*Triticum durum* L.) : « Simeto » et « Ammar 6 ». L'expérimentation a été conduite en pots sous serre et au laboratoire à l'Université 20 Août 1955 de Skikda durant l'année académique 2025-2026, en appliquant trois doses croissantes du biofertilisant : un témoin ($T_0 = 0$ g), un traitement à 1% ($T_1 = 50$ g) et un traitement maximal à 3% ($T_2 = 150$ g).

Les résultats montrent que la concentration maximale à 3% (T_2) est le meilleur traitement, optimisant la croissance vegetative (longueur de la tige : 53,53 cm, chlorophylle : 42,88) et maximisant le rendement final avec un record de 17,92 g/pot. Sur le plan variétal, la variété « Ammar 6 » a présenté la meilleure réponse face à la fertilisation, enregistrant une augmentation spectaculaire de rendement de +90,64% sous l'effet de la dose T_2 par rapport au témoin. La variété « Simeto » s'est distinguée par son potentiel génétique intrinsèque pour le poids de 100 grains. En conclusion, l'application de ce biofertilisant à 3% s'avère la formule la plus performante pour une céréaliculture durable.

Mots-clés: Blé dur (*Triticum durum* L.), Biofertilisant, Jus de compost, Croissance, Rendement

Membre de Jury:

Présidente:	M^me^ Souilah Nabila	Université du 20 Aout 1955 - Skikda
Examinatrice:	M^me^ : BOUNOUARA .Z	Université du 20 Aout 1955 - Skikda
Promotrice:	M^me^ LARIT SABAH	Université du 20 Aout 1955 - Skikda

Année universitaire 2025/2026