



UNIVERSITE
Abdelhamid Ibn Badis
MOSTAGANEM

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE
ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
Université Abdelhamid Ben Badis Mostaganem
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département d'agronomie



UNIVERSITE
Abdelhamid Ibn Badis
MOSTAGANEM

Mémoire de fin d'études
En vue de l'obtention du diplôme de
Master en sciences agronomiques
Spécialité : Technologies Avancées pour l'Agriculture de Précision
Thème

Analyse des facteurs influençant la
Croissance des Plantes : Étude et
Modélisation

Préparé par :

KHAOUID Taqiyeddine

Constitution de Jury

Présidente : D^r. Yahiaoui Hassiba MCB Université de Mostaganem
Examineur : P^r. Lahouari Dahloun Professeur Université de Mostaganem
Encadrante : D^r. Fatima Zohra Younsi MCA Université de Mostaganem

Année Universitaire 2024-2025

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude et ma reconnaissance à Allah Tout-Puissant, Le Fort, Le Miséricordieux, qui m'a donné la force, la volonté et le courage de mener à bien ce travail.

Mes sincères remerciements et ma profonde reconnaissance vont également à mon estimée professeure, Fatima Zohra Younsi, pour avoir accepté d'encadrer cette recherche, pour son dévouement, ses précieux conseils et son soutien continu tout au long de l'élaboration de ce travail.

Un merci sincère et toute ma gratitude à mes chers parents. Je sais que, peu importe à quel point je vous remercie, je ne pourrai jamais vous rendre justice. Les mots de remerciement eux-mêmes s'inclinent devant vous car vous êtes bien plus grands qu'eux. Je n'oublie pas non plus les membres de ma famille et mes amis.

Enfin, je tiens à remercier tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, m'ont aidé durant mon travail, que ce soit par leurs conseils et leurs connaissances, ou par leur soutien et leur présence dans les moments les plus difficiles.

Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail aux êtres qui me sont très chers, et
sans lesquels je n'aurais jamais atteint le stade où je suis
actuellement.*

Mes chères parents

*Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour et
ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour
mon instruction et mon bien être que ce travail soit le
témoignage de ma reconnaissance et de mon amour sincère et
fidèle.*

*À mes frères et sœurs, les mots ne suffisent guère pour
exprimer l'adoration que je porte pour vous.*

Et à tous leurs enfants, je vous aime.

Résumé

Ce mémoire porte sur l'analyse des effets de différents types de fertilisation sur la croissance de deux cultures : le blé et le tournesol. L'étude s'appuie sur des données agronomiques collectées en conditions réelles, incluant trois variables climatiques majeures : la température, l'humidité relative de l'air et la vitesse du vent.

Une première analyse descriptive a permis de caractériser les tendances générales de croissance pour chaque plante selon les traitements appliqués. Ensuite, une analyse de variance (ANOVA) a été menée afin de déterminer la significativité des différences observées entre les types de fertilisation. Enfin, une régression linéaire multiple a été appliquée pour modéliser la hauteur des plantes en fonction des variables climatiques, permettant d'évaluer l'influence conjointe de ces facteurs environnementaux.

Les résultats obtenus offrent des pistes d'interprétation quant à l'efficacité des fertilisants testés et mettent en évidence les interactions entre conditions climatiques et développement végétal, contribuant ainsi à une meilleure compréhension des pratiques culturales adaptées aux deux espèces étudiées.

Mots-clés : Modélisation des cultures, Croissance des plantes, Facteurs climatiques, Analyse descriptive, ANOVA, Régression linéaire multiple, Données agronomiques, Pratiques agricoles.

Abstract

This thesis focuses on analyzing the effects of different fertilization types on the growth of two crops: wheat and sunflower. The study is based on agronomic data collected under real conditions, including three key climatic variables: temperature, relative humidity, and wind speed.

An initial descriptive analysis was conducted to identify general growth trends for each plant according to the applied treatments. This was followed by an analysis of variance (ANOVA) to determine the significance of differences observed between fertilization types. Finally, multiple linear regression was performed to model plant height as a function of climatic variables, allowing for an assessment of the combined influence of these environmental factors.

The results provide insights into the effectiveness of the tested fertilizers and highlight the interactions between climatic conditions and plant development, thus contributing to a better understanding of cultivation practices suited to the two studied species.

Keywords : Crop modeling, Plant growth, Climatic factors, Descriptive analysis, ANOVA, Multiple linear regression, Agronomic data, Agricultural practices.

ملخص

يتناول هذا المذكرة تحليل تأثير أنماط مختلفة من التسميد على نمو محصولين زراعيين، وهما القمح وعباد الشمس. وتعتمد الدراسة على بيانات زراعية تم جمعها في ظروف ميدانية حقيقية، وتشمل ثلاثة متغيرات مناخية رئيسية: درجة الحرارة، الرطوبة النسبية للهواء، وسرعة الرياح. أُجري تحليل وصفي أولي لتحديد الاتجاهات العامة لنمو كل نبتة وفقاً للمعالجات المطبقة. بعد ذلك، تم تنفيذ تحليل التباين (ANOVA) بهدف التحقق من دلالة الفروقات بين أنواع التسميد المختلفة. وأخيراً، تم تطبيق تحليل الانحدار الخطي المتعدد لنمذجة ارتفاع النباتات استناداً إلى المتغيرات المناخية، مما أتاح تقييم التأثير المشترك لهذه العوامل البيئية.

تقدم النتائج المتحصل عليها مؤشرات تفسيرية حول فعالية الأسمدة المستخدمة، كما تبرز التفاعلات بين الظروف المناخية والنمو النباتي، مما يساهم في فهم أفضل للممارسات الزراعية الملائمة لكل من النوعين المدروسين.

كلمات مفتاحية: نمذجة المحاصيل، نمو النباتات، العوامل المناخية، التحليل الوصفي، تحليل التباين (ANOVA)، الانحدار الخطي المتعدد، البيانات الزراعية، الممارسات الزراعية.

Liste des figures

Figure 1 Plante de blé.....	5
Figure 2 Cycle du blé	6
Figure 3 Représentation graphique de la hauteur de blé par rapport au type de fertilisant.....	34
Figure 4 Représentation graphique de la hauteur de Tournesol par rapport au type de fertilisant.....	34
Figure 5 Illustration de moyenne des hauteurs (Blé)	37
Figure 6 Illustration de moyenne des hauteurs (Tournesol)	37

Liste des tableaux

Tableau 1 Classification botanique du blé	5
Tableau 2 Classification botanique du tournesol	12
Tableau 3 les résultats des mesures (Blé - Fertilisation organique / Fertilisation organique brûlée)..	30
Tableau 4 Résultats des mesures préliminaires (Tournesol - Fertilisation organique / Fertilisation organique brûlée/ Tournesol - Azolla / Groupe témoin T ₀).....	32
Tableau 5 Calcul de la moyenne pour la température en °C pour chaque type de fertilisation.	35
Tableau 6 Calcul de la moyenne pour l'humidité en % pour chaque type de fertilisation.	35
Tableau 7 Calcul de la moyenne pour le vent en Km/h pour chaque type de fertilisation.....	35
Tableau 8 Calcul de la moyenne pour la hauteur des plantes (en cm) pour chaque type de fertilisation.	36
Tableau 9 Tableau ANOVA a un facteur pour Blé	39
Tableau 10 Tableau ANOVA a un facteur pour Tournesol	41
Tableau 11 Tableau des données simulées (blé) avec fertilisation organique	43
Tableau 12 Résultats de la régression pour fertilisation organique.....	44
Tableau 13 Tableau des données simulées (blé) avec fertilisation organique brûlé.....	45
Tableau 14 Résultats de la régression pour fertilisation organique brûlé	45
Tableau 15 Tableau des données simulées (Tournesol) avec et sans fertilisation	48
Tableau 16 Résultats de la régression pour fertilisation F.O, F.O.B, A.S et T ₀	48

Table des matières

Remerciements.....	2
Dédicaces.....	3
Introduction Générale	1
1. Contexte général.....	1
2. Problématique.....	2
3. Contribution.....	2
Chapitre 1. Culture du Blé et du Tournesol en Algérie: Enjeux Agronomiques et Durabilité	3
1. Introduction	3
2. La culture des plantes en Algérie.....	3
2.1. Le blé dur.....	3
2.2. Le tournesol	11
2.3. Problèmes environnementaux et durabilité de la culture du tournesol et du blé:.....	16
3. Conclusion.....	18
Chapitre 2 Analyse des Pratiques de Fertilisation	19
1. Introduction	19
2. Fertilisation.....	19
3. Le but de la fertilisation.....	19
4. Pratiques appliquées pour atteindre les objectifs de la fertilisation :	20
5. Défis liés à la fertilisation :	20
6. Analyse des données.....	21
7. L'analyse descriptive	21
7.1 Le mode	22
7.2. La moyenne (arithmétique)	22
7.3. Médiane	22
7.4. Variance	22
7.5. L'écart-type.....	23
7.6. Corrélation.....	23

7.7. Les quartiles.....	23
8. L'analyse de la variance (ANOVA)	24
9. Modèle Multiple (Régression Linéaire Multiple).....	25
10. Conclusion.....	28
Chapitre 3 Conception et réalisation	29
1. Introduction	29
2. Objectif.....	29
3. Dispositif Expérimental.....	29
4. Description des données	30
5. Analyse des Données.....	34
5.1. Analyse descriptive.....	34
5.2. Analyse ANOVA	38
5.3. La régression linéaire multiple	42
6. Conclusion.....	52
Conclusion Générale	53
Bibliographie	54

Introduction Générale

1. Contexte général

L'agriculture joue un rôle fondamental dans la sécurité alimentaire mondiale, fournissant les ressources nécessaires pour nourrir une population en croissance constante. Avec plus de 800 millions de personnes souffrant de faim chronique (FAO, 2022), l'augmentation de la productivité agricole est essentielle pour répondre à la demande alimentaire, en particulier dans les régions les plus vulnérables. Cependant, le secteur agricole est également l'un des plus affectés par le changement climatique, avec des phénomènes tels que les sécheresses prolongées, les inondations et la dégradation des sols qui menacent les rendements. Dans ce contexte, l'agriculture ne se limite plus à la simple production des aliments, elle devient une question de survie et de stabilité à l'échelle planétaire.

La croissance végétale est au cœur de la productivité agricole, déterminant directement le rendement des cultures. Une plante en bonne santé, avec un développement racinaire et foliaire optimal, peut mieux absorber les nutriments, résister aux stress environnementaux et maximiser sa production (Bláha,2019).

Les céréales jouent un rôle fondamental dans l'alimentation humaine et animale à travers le monde. Elles constituent la base de nombreux régimes alimentaires grâce à leur forte teneur en glucides, leur capacité de conservation et leur polyvalence. Parmi les céréales les plus cultivées, le blé occupe une place centrale. Utilisé pour produire la farine, il entre dans la composition d'aliments de base comme le pain, les pâtes ou les pâtisseries. Sa culture est largement répandue dans les zones tempérées, en particulier en Europe, en Amérique du Nord et en Asie (FAO, 2024).

Le tournesol, bien qu'il soit généralement classé parmi les oléagineux plutôt que les céréales, mérite une attention particulière pour sa contribution à l'agriculture et à l'alimentation. Les graines de tournesol sont utilisées pour produire de l'huile végétale de haute qualité, et ses résidus sont intégrés dans l'alimentation animale. De plus, la culture du tournesol est prisée pour sa résistance à la sécheresse et ses bénéfices pour la rotation des cultures (FAO, 2023).

Ces deux cultures représentent des piliers importants de l'agriculture moderne et sont essentielles pour la sécurité alimentaire mondiale.

2. Problématique

Comprendre les facteurs qui influencent la croissance des plantes permet d'optimiser les rendements agricoles et d'adapter les pratiques aux conditions environnementales. Aujourd'hui, cette croissance est menacée par des défis tels que la baisse de la fertilité des sols, le stress hydrique et les effets du changement climatique. Ces contraintes nécessitent des approches innovantes pour assurer une agriculture durable.

3. Contribution

Ce projet de fin d'études vise à mener une étude comparative sur l'efficacité de différentes méthodes de fertilisation organique en particulier le fumier de mouton traditionnel, le compost brûlé et l'Azolla séchée en évaluant leur impact sur la croissance du blé et du tournesol, ainsi que leur contribution à l'amélioration de la fertilité des sols et à la promotion d'une agriculture durable.

Organisation du mémoire

Hormis l'introduction et la conclusion, ce mémoire comporte trois chapitres :

Chapitre I : ce chapitre est consacré aux généralités sur l'agriculture, tant à l'échelle globale qu'au contexte spécifique de l'Algérie. Il présente également des notions fondamentales ainsi que des descriptions des cultures étudiées dans ce travail, à savoir le blé et le tournesol.

Chapitre II : est consacré à la présentation de quelques rappels sur l'analyse des données en particulier : l'analyse descriptive, le test ANOVA et l'analyse linéaire multiple.

Chapitre III : dans ce chapitre, nous présentons une série d'expérimentations portant sur l'analyse des données. Des modèles statistiques ont été utilisés afin d'évaluer l'impact des facteurs climatiques et agronomiques sur la croissance du blé et du tournesol.

Pour conclure, ce mémoire se termine par une synthèse des principaux résultats ainsi que par quelques recommandations visant à orienter les travaux futurs.

Chapitre 1. Culture du Blé et du Tournesol en Algérie: Enjeux Agronomiques et Durabilité

1. Introduction

L'agriculture en Algérie joue un rôle socio-économique majeur, avec des cultures céréalières et oléagineuses essentielles telles que le blé et le tournesol. Ces plantes, aux caractéristiques botaniques et physiologiques distinctes, sont au cœur des défis agricoles du pays.

Ce chapitre explore leurs spécificités, les facteurs influençant leur croissance et leur rendement, ainsi que les problématiques environnementales liées à leur culture. Nous aborderons également les principales maladies et ravageurs menaçant ces cultures, ainsi que leurs applications et produits dérivés, dans une perspective de durabilité et d'optimisation agronomique.

2. La culture des plantes en Algérie

2.1. Le blé dur

Le blé dur, céréale ancienne et essentielle à la sécurité alimentaire mondiale, joue un rôle crucial en Algérie, où il fournit plus de 60 % des calories et 10 à 15 % des protéines quotidiennes (Feillet, 2000).

En Algérie, l'essentiel de la production de blé dur est destiné à la consommation humaine directe, notamment dans l'industrie du pain et des pâtes alimentaires, qui représente plus de la moitié de la production nationale. Le reste est utilisé dans l'alimentation animale et dans d'autres industries telles que l'industrie de l'amidon. À l'échelle mondiale, le blé dur occupe la troisième place en termes de production après le maïs et le riz (Awika, 2011) et est considéré comme le plus consommé par l'homme. Le blé dur se distingue du blé tendre par la dureté de ses grains et leur couleur jaune. Ces propriétés le rendent idéal pour la production de semoule, utilisée dans la fabrication de pâtes et de couscous. Le blé tendre est utilisé pour produire de la farine, qui à son tour est utilisée pour fabriquer du pain, des bonbons et d'autres produits de boulangerie.

Malgré l'importance du blé dur dans l'alimentation algérienne, la production agricole nationale, notamment de blé et d'orge, reste insuffisante pour atteindre l'autosuffisance. Avec une production moyenne d'environ 26 millions de quintaux par an, l'Algérie dépend des importations pour satisfaire ses besoins en céréales (ITGC, 2007).

L'amélioration de la productivité du blé dur en Algérie est un objectif stratégique. Cela nécessite le développement et la sélection de variétés performantes adaptées aux climats arides et semi-arides de la région méditerranéenne, où le blé dur est largement cultivé. Les caractéristiques morphologiques, physiologiques et biochimiques de ces variétés doivent être améliorées pour assurer leur résistance aux conditions climatiques difficiles et atteindre une productivité élevée.

2.1.1. Caractéristiques botaniques et physiologiques du blé dur

La plante du blé est une graminée de hauteur moyenne pouvant atteindre jusqu'à 1.5 m selon les variétés et dont le limbe des feuilles est aplati. L'inflorescence d'un épi terminal se compose de fleurs parfaites (Bozzini, 1988). Il existe des variétés de blé dur semi-naines. Le système racinaire comprend des racines séminales produites par la plantule durant la levée, ainsi que des racines adventives (latérales) qui se forment plus tard à partir des nœuds à la base de la plante et constituent le système racinaire permanent. Le blé dur possède une tige cylindrique, dressé habituellement creuse et subdivisée en entrenœuds. Certaines variétés possèdent toutefois des tiges pleines (Clarke, 2002). Le chaume (talle) se forme à partir de bourgeons axillaires aux nœuds à la base de la tige principale. Le nombre de brin dépend de la variété, des conditions de croissances et de la densité de plantation. Dans des conditions normales une plante peut produire trois brins en plus de la tige principale (Bozzini, 1988). Comme pour d'autres graminées, les feuilles de blé dur se composent d'une base (gaine) entourant la tige, d'une partie terminale qui s'aligne avec les nervures parallèles et d'une extrémité pointue. Au point d'attache de la gaine de la feuille se trouve une membrane mince et transparente la ligule, comportant deux petits appendices latéraux, les oreillettes. La tige principale et chaque brin portent une inflorescence en épi terminal.

L'inflorescence du blé dur est un épi muni d'un rachis portant des épillets séparés par de courts entrenœuds (Bozzini, 1988). Chaque épillet compte deux glumes (bractées) renfermant de deux à cinq fleurs distiques sur une rachéole. Chaque fleur parfaite est enfermée dans des structures semblables à des bractées, soit la glumelle inférieure (lemme) et la glumelle supérieure (paléa).

Chacune compte trois étamines à anthère biloculaires, ainsi qu'un pistil à deux styles à stigmates plumeux. A maturité, le grain de pollen fusiforme contient habituellement trois noyaux. Chaque fleur peut produire un fruit à une seule graine, soit le caryopse. Chaque graine contient un large endosperme et un embryon aplati situé à l'apex de la graine et à proximité de la base de la fleur. La figure suivante présente une description de la plante de blé.

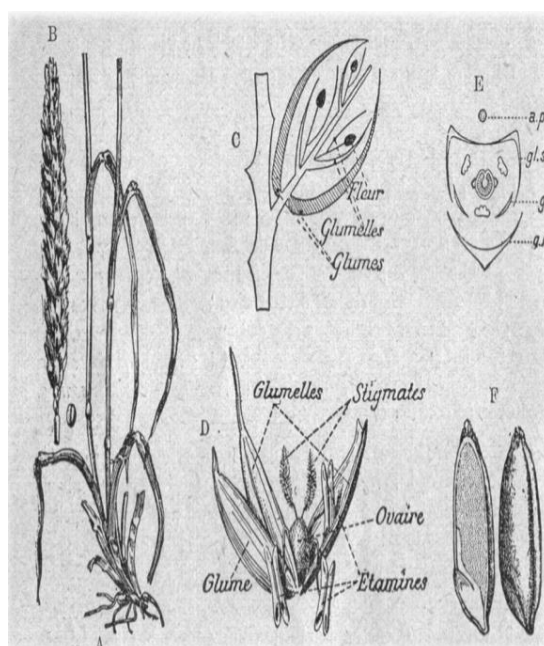


Figure 1 Plante de blé

2.1.2. Classification du blé dur

Le tableau suivant présente une classification botanique du blé dur.

Tableau 1 Classification botanique du blé

Embranchement	Spermaphytes
Sous embranchement	Angiospermes
Classe	Monocotylédones
Ordre	Commélimiflorales
Sous ordre	Poales
Famille	Graminae ou Poaceae;
Genre et espèce	<i>Triticum durum</i>

2.1.3. Caractéristiques physiologiques : Croissance, Adaptation et Qualité

Le blé dur est une céréale majeure, principalement cultivée pour la production de semoule et de pâtes alimentaires. Ses caractéristiques physiologiques déterminent sa croissance, son adaptation aux environnements variés et la qualité de ses grains. Voici une analyse détaillée :

a) Cycle de Développement :

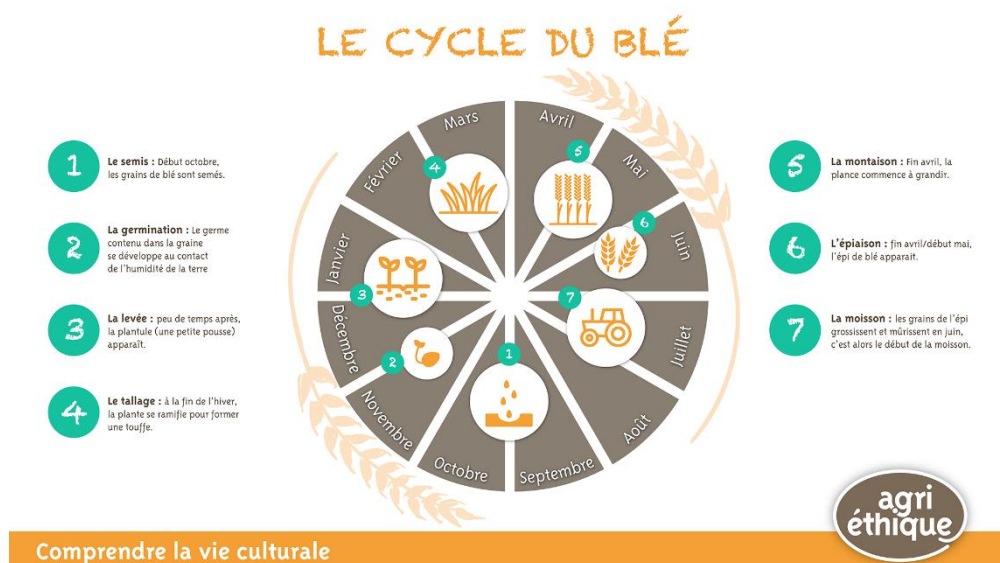


Figure 2 Cycle du blé

Phases clés :

- 1) **Germination :** Sensible à la température (optimum : 15–25°C) et à l'humidité du sol.
- 2) **Tallage :** Production de talles (jusqu'à 3–5 par plante) sous des conditions optimales (lumière, nutriments).
- 3) **Montaison :** Allongement des tiges et développement des épis.
- 4) **Floraison :** Autogame (autopollinisation), sensible au stress hydrique ou thermique.
- 5) **Maturation :** Accumulation des réserves dans le grain (amidon, protéines).

Durée du cycle : 120–180 jours selon les variétés et le climat.

b) Adaptation et Résistance :

- La tolérance au froid est cruciale pour les variétés d'hiver.
- La résistance à la verse, aux maladies fongiques et bactériennes, est essentielle pour la productivité.

— Le blé dur est plus résistant à la sécheresse que le blé tendre.

c) Qualité des Grains :

— Le poids de mille grains (PMG) influence le rendement.

— La teneur en protéines, en particulier le gluten, détermine la qualité de la semoule et des pâtes.

d) Adaptation Environnementale :

Le blé dur est adapté aux climats chauds et secs.

e) Composition Nutritionnelle :

Il est riche en glucides, protéines (gluten), fibres, vitamines et minéraux.

2.1.4. Facteurs influençant la croissance et le rendement

La croissance optimale du blé est un processus complexe fortement influencé par une gamme variée de facteurs environnementaux. Ces facteurs comprennent la disponibilité d'une eau suffisante pendant les stades de croissance critiques, des températures appropriées qui soutiennent les processus physiologiques sans stress, et une quantité adéquate de lumière solaire pour répondre aux besoins de la photosynthèse. De plus, les éléments minéraux essentiels disponibles dans le sol, tels que l'azote, le phosphore et le potassium, jouent un rôle crucial dans la croissance et le développement sains de la plante. Enfin, la nature du sol lui-même, en termes de sa structure et de sa capacité de rétention d'eau et de drainage, affecte considérablement la capacité de la plante à accéder aux ressources nécessaires (Taiz & Zeiger, 2010).

• **Facteurs génétiques :**

Variété de blé : Le choix de la variété est crucial. Certaines variétés sont plus adaptées à certaines conditions climatiques, plus résistantes aux maladies ou plus productives.

Potentiel génétique : Chaque variété a un potentiel de rendement inhérent, déterminé par sa constitution génétique.

• **Facteurs agronomiques :**

Préparation du sol : Un labour et un nivellement adéquats favorisent une bonne implantation.

Stade de semis: Le succès de cette installation dépend: du choix de la variété, adaptée au climat et au sol de la zone, de la date du semis, de la densité de semis et de la profondeur de semis.

Lutte contre les ravageurs et les maladies : La protection contre les insectes, les maladies fongiques et les mauvaises herbes est cruciale.

Rotation des cultures : La rotation des cultures améliore la fertilité du sol et réduit les risques de maladies.

- **Facteurs biotiques :**

Maladies : Les maladies fongiques, virales et bactériennes peuvent réduire considérablement le rendement.

Ravageurs : Les insectes, les nématodes et autres ravageurs peuvent endommager les cultures.

Mauvaises herbes : Les mauvaises herbes peuvent concurrencer le blé pour les ressources.

- **Facteurs environnementaux :**

Climat et température : La température permettant une croissance optimale et un rendement maximum se situe entre 15 et 20°C (Dupont et Altenbach, 2003). En conditions méditerranéennes, les fortes températures en dessous de 30°C sont stressantes. Quant aux basses températures et à la tolérance au froid, le blé dur a la capacité de supporter des températures inférieures à 4°C, considérées comme la température minimale pour la croissance.

Afin de préserver la qualité des grains et de maximiser le potentiel de la culture, le blé dur est implanté dans des régions où le risque climatique en fin de cycle est réduit. S'il fallait résumer les principales caractéristiques d'un milieu favorable au blé dur, on citerait : un sol sain et une fin de cycle ensoleillée, car le blé dur a des racines fragiles et une fin de cycle ensoleillée car les épis sont fragiles (Nathaliegontard, 2017) (Bekkari, 2022).

Le sol : Les sols qui conviennent le mieux à la production de blé dur sont ceux qui sont bien aérés, profonds et comportent au moins 0,5% de matière organique. Le pH optimal du sol est de 5,5 à 7,5. Le blé dur est sensible à la salinité du sol (Brink & Belay, 2006)

Bien drainés mais pas trop sujets au stress hydrique, surtout pendant la période d'accumulation des réserves dans le grain. L'implantation du blé dur dans des terres se ressuyant mal le rend plus sensible aux maladies cryptogamiques telles que les piétins-échaudage et les fusarioses.

L'eau : Le blé dur est plus adapté que le blé tendre aux régions où la pluviométrie annuelle moyenne est faible. La production de blé dur est concentrée sur les hautes terres du centre, du Nord et du Nord-Ouest, à 1800-2800m d'altitude. Pour produire une récolte acceptable, il faut au moins 250 mm d'eau (Chekhma et al., 2020).

La fertilisation : La fertilisation constitue l'un des facteurs les plus déterminants dans l'amélioration de la production de la culture. Ces effets sur l'accroissement des niveaux de rendement ne sont plus à démontrer. En général, les besoins en éléments fertilisants (N, P, K) des espèces de grandes cultures pour la production d'un (01) quintal de grain (Mouelhi et al., 2016)

La fertilisation azotée : Considérant la forte mobilité de l'azote, il convient donc de fractionner la dose d'azote en deux ou trois apports, en vue de fournir l'azote au moment où la culture en a besoin et de minimiser les pertes par lessivage.

La fumure azotée est généralement apportée en deux fois : au début du tallage (fin janvier) : 40 kg/ha et au début de la montaison (au stade 10 cm d'élongation du maître-brin) : 40 kg/ha (Sabah, 2018).

2.1.5. Maladies et ravageurs

Le blé est vulnérable à plusieurs maladies comme la rouille et la fusariose, qui affectent le rendement. Il est aussi attaqué par des ravageurs tels que les pucerons et les vers fil-de-fer. Une gestion intégrée permet de limiter efficacement ces menaces :

— Maladies fongiques

- **Rouilles (jaune, brune, noire)** : Ces maladies provoquent des pustules sur les feuilles et les tiges, réduisant la photosynthèse et le remplissage des grains.
- **Septoriose** : Caractérisée par des taches foliaires, elle peut entraîner une perte de surface foliaire et une diminution du rendement.
- **Fusariose de l'épi** : Cette maladie affecte les épis, entraînant une contamination des grains par des mycotoxines.
- **Oïdium** : Un feutrage blanc apparaît sur les feuilles, réduisant la capacité de la plante à photosynthétiser.
- **Piétin-verse** : Cette maladie affecte la base de la tige, provoquant un affaiblissement et un risque de verse.

— Maladies virales

- **Jaunisse nanisante de l'orge (JNO)** : Transmise par les pucerons, elle provoque un jaunissement et un nanisme des plantes.

— Ravageurs du blé

- **Pucerons** : Ils se nourrissent de la sève des plantes, affaiblissant la culture et transmettant des virus.
- **Cécidomyies** : Leurs larves se nourrissent des épis, entraînant des pertes de rendement.
- **Mouches des céréales** : Les larves de ces mouches creusent des galeries dans les tiges, perturbant la croissance.
- **Cicadelles** : Ces insectes peuvent également transmettre des maladies virales.
- **Tordeuses** : Elles endommagent les feuilles et les épis.

— Lutte contre les maladies

La lutte contre ces maladies et ravageurs repose sur plusieurs stratégies :

- **Prévention** :
 - Rotation des cultures
 - Choix de variétés résistantes
 - Travail du sol approprié
 - Semis à des dates optimales
- **Lutte chimique** : Utilisation de fongicides et d'insecticides, en respectant les doses et les délais d'application.
- **Lutte biologique** : Utilisation d'auxiliaires naturels (insectes prédateurs, etc.).
- **Surveillance** : Observation régulière des cultures pour détecter les premiers signes d'attaque.

2.1.6. Applications et produits dérivés

Le blé est largement utilisé dans l'industrie agroalimentaire pour la fabrication de produits de base tels que la farine, le pain, les pâtes et les biscuits. Il entre aussi dans la composition de produits transformés comme les céréales et les aliments. Nous présentons dans la suite quelques utilisations :

L'alimentation humaine

Farine : C'est le produit le plus courant, utilisé dans la fabrication du pain, des pâtes, des pâtisseries, des biscuits, des tartes et de nombreux autres produits de boulangerie. Différents

types de blé (tendre et dur) produisent des farines aux propriétés différentes, adaptées à des usages spécifiques.

Semoule : Elle est obtenue à partir du blé dur et est utilisée dans le couscous, les pâtes et certains desserts.

Germe de blé : Riche en nutriments, il peut être consommé tel quel ou ajouté aux céréales, yaourts ou pâtisseries.

Son de blé : Riche en fibres, il est utilisé comme complément nutritionnel pour favoriser le transit intestinal.

Applications industrielles

Amidon : utilisé dans l'industrie alimentaire comme épaississant, liant ou agent texturant. Il est également utilisé dans la fabrication de papier, d'adhésifs et de textiles.

Gluten : Protéine de blé utilisée pour améliorer l'élasticité et la texture de certains produits alimentaires. Le gluten a également des applications dans l'industrie cosmétique.

Autres produits : La paille de blé peut être utilisée pour produire du papier, des matériaux de construction et même des produits chimiques.

Alimentation animale

Le blé et ses sous-produits (son, produits de la meunerie) sont utilisés comme aliments pour le bétail.

2.2. Le tournesol

Le tournesol (*Helianthus annuus L.*) est une plante annuelle oléagineuse de la famille des Asteraceae, connue pour suivre la course du soleil. Son nom scientifique évoque sa forme de « fleur du soleil ». Originaire d'Amérique du Nord, il était cultivé dès le XV^e siècle par les peuples autochtones pour ses graines, mais aussi à des fins médicinales, colorantes et ornementales. Introduit en Europe au XVI^e siècle par les Espagnols, il fut d'abord apprécié pour son aspect décoratif. Progressivement, ses usages se diversifièrent : alimentation animale, production de teinture, papier, et surtout huile. Des améliorations variétales permirent d'augmenter sa teneur en huile et sa résistance. Réintroduit en Amérique du Nord en 1880, sa culture s'étendit en Europe au XX^e siècle, puis dans le monde entier dès 1960.

2.2.1. Caractéristiques physiologiques et botaniques du tournesol

Le tournesol (*Helianthus annuus* L.), appartenant à la famille des Asteraceae, est une plante annuelle dicotylédone cultivée principalement pour ses graines riches en huile. Il se caractérise par une tige droite, rigide et peu ramifiée, pouvant atteindre entre 1,2 et 2,5 mètres de hauteur selon les conditions de culture et la variété. Ses grandes feuilles, alternes, ovales à triangulaires, présentent des nervures bien marquées. L'inflorescence du tournesol est un grand capitule pouvant mesurer jusqu'à 30 centimètres de diamètre. Elle est composée de fleurs périphériques ligulées, stériles et très visibles (souvent assimilées à des pétales), entourant un disque central formé de fleurs tubulées fertiles. Le fruit est un akène, communément appelé « graine », de forme allongée et protégé par une enveloppe dure.

Sur le plan physiologique, le tournesol est une plante robuste à croissance rapide. Les jeunes plantes présentent un comportement d'héliotropisme, c'est-à-dire un mouvement de la tête suivant la course du soleil, qui cesse à la floraison. Le cycle de développement du tournesol s'étale entre 90 et 160 jours et comprend plusieurs phases clés : la levée, le début de floraison (étape particulièrement critique pour le rendement), le remplissage des graines, et enfin la maturité physiologique. Il apprécie des températures comprises entre 25 et 28 °C pour une croissance optimale, mais reste sensible aux gelées à partir de -2 à -3 °C. Il se distingue par une bonne tolérance à la sécheresse, grâce à un système racinaire pivotant et profond, bien que les stress hydriques en période de floraison ou de remplissage des graines puissent nuire au rendement. Sa phase végétative est marquée par un développement foliaire rapide, et il est capable de compenser certains stress, sauf en période critique. D'un point de vue nutritionnel, le tournesol est exigeant, notamment en potassium et en azote, et possède une bonne aptitude à extraire les éléments nutritifs du sol.

Classification du blé dur

Le tableau suivant présente une classification botanique du tournesol.

Tableau 2 Classification botanique du tournesol

Règne	Plantae
Division	Magnoliophyta

Classe	Magnoliopsida
Ordre	Asteraces
Famille	Asteraceae
Genre et espèce	<i>Helianthus</i>

2.2.2. Facteurs influençant la croissance et le rendement

La croissance et le rendement du tournesol sont influencés par une multitude de facteurs, qu'ils soient environnementaux, génétiques ou liés aux pratiques agricoles. Voici les principaux éléments à considérer (Gordeyeva et al., 2024):

— **Facteurs génétiques :**

Variété: Le choix de la variété est primordial. Certaines variétés sont plus précoces, d'autres plus résistantes aux maladies ou plus riches en huile.

— **Facteurs agronomiques :**

Rotation des cultures : Une rotation adéquate permet de limiter les risques de maladies et d'améliorer la fertilité du sol.

Densité de semis: Une densité de semis appropriée permet d'optimiser l'utilisation des ressources et d'obtenir un rendement maximal.

Lutte contre les ravageurs et les maladies : La lutte contre les mauvaises herbes, les insectes et les maladies est cruciale pour éviter les pertes de rendement.

Irrigation: Le tournesol résiste bien à la sécheresse, à condition d'éviter le stress hydrique au moment de la floraison (stade critique). Il faut éviter les excès d'eau avant floraison, car ils favorisent le développement végétatif au détriment de la production du grain.

Fertilisation: Les besoins en engrais du tournesol varient en fonction de ses stades de croissance. Au début, la plante a besoin de petites quantités d'engrais, qui augmentent progressivement avec l'âge. En ce qui concerne les éléments nutritifs essentiels, le tournesol a besoin de la plus grande quantité d'azote au début de la formation des disques et jusqu'à la fin de la floraison, tandis qu'il a besoin de la plus grande quantité de phosphore pendant la période de

floraison. Quant au potassium, la culture de tournesol en a besoin en grandes quantités pendant la phase de formation des disques et jusqu'à la phase de maturité cireuse.

— **Facteurs environnementaux :**

Climat: Le tournesol préfère les climats chauds et ensoleillés. La température optimale pour sa croissance se situe entre 18 et 27°C. Comme l'ensoleillement est crucial, surtout pendant la phase de maturation des graines, car il influence directement la teneur en huile.

Le Sol: Il s'adapte à tous les types de sol, préférant cependant les sols argilo-sableux, riches en matière organique et avec un pH compris entre 6,0 et 7,5. Frais et profonds. La culture de tournesol réussit bien dans les bonnes terres à blé. Le système racinaire du tournesol est sensible aux sols tassés.

Lumière : La lumière est indispensable au tournesol pour accomplir son cycle végétatif. Le rayonnement a un impact sur la productivité et sur la vitesse de croissance.

Autres facteurs:

Pollinisation: Le tournesol est une plante mellifère, la présence d'abeilles favorise la pollinisation et donc le rendement.

2.2.3. Maladies et ravageurs

— **Maladies fongiques**

- **Mildiou (*Plasmopara halstedii*):** Cette maladie est causée par un oomycète qui provoque le nanisme des plantes, des taches chlorotiques sur les feuilles et un feutrage blanc sous les feuilles.
- **Phoma (*Phoma macdonaldii*):** Le phoma se manifeste par des lésions noires sur les feuilles, les tiges et le collet et les attaques au collet peuvent être particulièrement dommageables.
- **Phomopsis (*Diaporthe helianthi*) :** Cette maladie provoque des nécroses sur les feuilles et les tiges, et peut entraîner la casse des tiges et l'échaudage du capitule.
- **Sclérotinia (*Sclerotinia sclerotiorum*) :** Le sclérotinia attaque diverses parties de la plante, notamment le collet, les tiges, les feuilles et le capitule.
- **Botrytis (*Botrytis cinerea*) :** Provoque un feutrage gris sur les capitules et les tiges, favorisé par une humidité élevée.

- **Verticillium (Verticillium dahliae)**: Provoque le flétrissement et le dessèchement des feuilles.
- **Ravageurs du tournesol**
 - **Pucerons** : Ils sucent la sève des plantes, affaiblissant leur croissance.
 - **Noctuelles terricoles** : Leurs larves s'attaquent aux jeunes plants, causant des dégâts importants.
 - **Pyrale du tournesol (Homoeosoma nebulosa)** : Ses larves endommagent les capitules.
 - **Taupins** : Les larves s'attaquent aux racines et aux tiges souterraines
 - **Oiseaux**: Ils peuvent consommer les graines, surtout en fin de cycle **Lutte**
- **Stratégies de Lutte**
 - **Prévention** :
 - Rotation des cultures
 - Choix de variétés résistantes
 - Travail du sol approprié
 - Semis de qualité
 - **Lutte chimique** : Utilisation de fongicides et d'insecticides appropriés, en respectant les doses et les délais d'application.
 - **Lutte biologique** : Utilisation d'auxiliaires naturels (insectes prédateurs, etc.).
 - **Surveillance** : Observation régulière des cultures pour détecter les premiers signes d'attaque.

2.2.4. Applications et produits dérivés

— Applications alimentaires :

Huile de tournesol : Principal produit dérivé, utilisée pour la cuisson, la friture et comme ingrédient dans les aliments transformés. L'huile est riche en acides gras essentiels tels que l'acide linoléique et l'acide oléique, offrant des avantages pour la santé cardiovasculaire.

Graines de tournesol : Consommées comme collation, elles sont riches en nutriments, notamment en protéines et en antioxydants. Les graines sont également utilisées pour produire des farines et des ingrédients fonctionnels pour améliorer la valeur nutritionnelle des aliments.

— **Applications industrielles :**

Biocarburants : L'huile de tournesol est utilisée pour produire du biodiesel grâce à sa haute teneur en huile (plus de 40 % par graine). Ce biocarburant est durable et émet moins de polluants que les carburants fossiles.

Cosmétiques : L'huile est intégrée dans les produits de soins personnels grâce à ses propriétés hydratantes, régénérantes et riches en vitamine E. Elle est particulièrement utilisée dans les formulations capillaires et cutanées.

Peintures et lubrifiants : Utilisée comme matière première dans la fabrication de peintures écologiques et de lubrifiants industriels.

— **Applications agricoles :**

Engrais vert : Les racines profondes du tournesol améliorent la structure du sol et réduisent sa compaction, favorisant ainsi la rotation des cultures.

Silage : Le tournesol peut être utilisé comme culture fourragère alternative au maïs dans certaines régions.

— **Applications médicales :**

Feuilles de tournesol : Utilisées dans des préparations alimentaires et médicales pour réduire la pression artérielle, promouvoir la digestion et nettoyer l'organisme. Ces feuilles offrent des effets hypotenseurs sans toxicité.

Antioxydants : Les composés phénoliques extraits des sous-produits du tournesol sont utilisés pour développer des aliments fonctionnels ayant des propriétés thérapeutiques contre les maladies liées au stress oxydatif.

2.3. Problèmes environnementaux et durabilité de la culture du tournesol et du blé:

La culture des céréales, en particulier des cultures vitales comme le tournesol et le blé, est confrontée à des défis environnementaux similaires qui menacent leur durabilité à long terme. Ces problèmes peuvent être résumés comme suit :

2.3.1. Impact environnemental de la culture du blé

Utilisation intensive des ressources:

- La culture nécessite de grandes quantités d'eau, ce qui entraîne l'épuisement des ressources en eau, en particulier dans les régions arides.

- L'utilisation d'engrais azotés entraîne des émissions de gaz à effet de serre et la pollution des eaux souterraines.
- Les pesticides ont des effets néfastes sur la biodiversité et la santé humaine.

Dégradation des sols:

- Le labour intensif et la monoculture entraînent l'épuisement des sols, réduisant ainsi leur fertilité et leur capacité à stocker le carbone.
- L'érosion des sols, exacerbée par le changement climatique, entraîne la perte de terres arables.

Changement climatique:

- Les températures élevées et les phénomènes météorologiques extrêmes (sécheresse et inondations) affectent le rendement et la qualité des cultures.
- L'augmentation du dioxyde de carbone atmosphérique peut réduire la teneur nutritionnelle de certaines cultures.

Perte de biodiversité:

- La monoculture réduit la diversité des espèces végétales et animales dans les écosystèmes agricoles.
- La disparition des variétés traditionnelles, mieux adaptées aux conditions locales, affaiblit la résilience des cultures.

2.3.2. Vers une culture du blé plus durable

Pour surmonter ces problèmes, des stratégies communes peuvent être adoptées pour une culture plus durable :

Agriculture de conservation:

- Application de techniques telles que le semis direct, la couverture végétale permanente et la rotation des cultures pour maintenir la santé des sols et réduire l'érosion.
- Utilisation de techniques d'irrigation modernes qui réduisent la consommation d'eau et améliorent l'efficacité de son utilisation.
- Amélioration de l'agroforesterie, qui combine arbres et cultures, la fertilité des sols et la biodiversité.

Gestion intégrée des éléments nutritifs et des ravageurs:

- Utilisation de l'agriculture de précision pour optimiser l'utilisation des engrais et des pesticides, réduisant ainsi leur impact environnemental.
- Développement de variétés de cultures résistantes aux maladies et aux ravageurs pour réduire le besoin de pesticides.

Amélioration génétique:

- Sélection de variétés de cultures plus efficaces dans l'utilisation de l'eau et des éléments nutritifs.
- Développement de variétés adaptées aux conditions climatiques futures.

Réduction des pertes et du gaspillage:

- Amélioration des techniques de stockage et de transformation des cultures pour réduire les pertes après récolte.
- Sensibilisation des consommateurs à l'importance de réduire le gaspillage alimentaire.

Lutte biologique contre les ravageurs:

- Recours à la lutte biologique contre les ravageurs, en utilisant des ennemis naturels, pour réduire l'utilisation de pesticides chimiques.

Gestion des déchets:

- Gestion appropriée des déchets de récolte, par exemple en utilisant les résidus de récolte comme engrais organique.

3. Conclusion

En conclusion, les céréales et oléagineux jouent un rôle clé dans la sécurité alimentaire mondiale. Malgré des défis de production, notamment en Algérie, des efforts sont faits pour améliorer ce secteur essentiel. La culture du tournesol se démarque par son potentiel économique et ses usages variés. Il est crucial de renforcer la production et la qualité des cultures via la recherche, la technologie et des politiques agricoles adaptées. Une approche durable et collaborative est indispensable pour répondre aux enjeux alimentaires futurs.

Dans le chapitre suivant, nous allons entamer une étude statistique pour évaluer la production du blé dur et du tournesol.

Chapitre 2

Analyse des Pratiques de Fertilisation

1. Introduction

La fertilisation est un processus fondamental en agriculture visant à apporter aux plantes les nutriments essentiels à leur croissance, leur développement et l'obtention d'une production de haute qualité et quantité, tout en maintenant la fertilité et la durabilité du sol. L'analyse de données joue un rôle clé dans divers domaines, y compris l'agriculture, où elle optimise la gestion des cultures et les décisions stratégiques. Elle permet d'ajuster l'irrigation, de prévoir les rendements ou de détecter précocement maladies et ravageurs. Elle est aussi essentielle en recherche pour interpréter les données issues des essais sur le terrain.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les fondements du concept de fertilisation ainsi que les notions de base de l'analyse de données et les méthodes à utiliser dans ce travail.

2. Fertilisation

La fertilisation implique l'utilisation de matières organiques (comme le fumier et le compost) ou chimiques (comme les engrais azotés et phosphatés) ou un mélange des deux, appliquées de diverses manières telles que l'épandage direct dans le sol, la pulvérisation foliaire ou via les systèmes d'irrigation. L'objectif principal est d'atteindre un équilibre entre la satisfaction des besoins des plantes, l'amélioration de la qualité des cultures et la réduction de l'impact environnemental résultant de l'utilisation irréfléchie des engrais, tels que la pollution de l'eau ou l'émission de gaz à effet de serre.

3. Le but de la fertilisation

La fertilisation vise à répondre aux besoins nutritionnels des plantes en leur apportant les éléments essentiels de manière équilibrée selon leurs stades de croissance. Elle permet

d'améliorer la productivité et la qualité des cultures, tout en maintenant la fertilité des sols grâce à l'apport d'engrais organiques et minéraux. Une gestion raisonnée limite les impacts environnementaux et favorise une utilisation durable des ressources. Adaptée aux conditions locales et aux besoins spécifiques des cultures, la fertilisation contribue aussi à la rentabilité économique de l'agriculture.

4. Pratiques appliquées pour atteindre les objectifs de la fertilisation :

- **Analyse du sol :** Des analyses régulières du sol sont effectuées pour déterminer les niveaux de nutriments et le pH (potentiel Hydrogène) afin de définir le type et la quantité d'engrais nécessaires.
- **Choix des engrais appropriés :** Les engrais chimiques peuvent être utilisés pour des résultats rapides, les engrais organiques pour améliorer le sol à long terme, ou une combinaison des deux.
- **Moment opportun :** Appliquer les engrais aux moments où les plantes en ont le plus besoin, comme au début de la saison de croissance ou au stade de la floraison.
- **Techniques d'application :** Utiliser des méthodes telles que la pulvérisation foliaire, la fertigation (fertilisation via l'irrigation), ou l'épandage direct dans le sol pour assurer une absorption optimale.
- **Intégration des pratiques durables :** Comme la rotation des cultures, la culture d'engrais verts (tels que les légumineuses qui fixent l'azote), ou le recyclage des déchets agricoles.

5. Défis liés à la fertilisation :

- **Sur-fertilisation :** Peut entraîner une accumulation de sels dans le sol, une toxicité pour les plantes, ou une pollution de l'environnement.
- **Sous-fertilisation :** Peut provoquer une carence en nutriments, affectant négativement la croissance et la productivité des plantes.
- **Coûts :** Les engrais, en particulier les chimiques, peuvent être coûteux, nécessitant une planification minutieuse pour obtenir le meilleur rendement économique.
- **Changements climatiques :** Affectent les besoins des plantes et leur réponse aux engrais, nécessitant des ajustements continus des stratégies de fertilisation.

6. Analyse des données

L'analyse des données est un ensemble de techniques statistiques et informatiques visant à examiner, nettoyer, transformer et modéliser des données brutes afin d'en extraire des informations utiles, de tirer des conclusions et de soutenir la prise de décision. Elle permet de traiter des volumes importants de données pour en dégager les aspects les plus significatifs et comprendre la structure sous-jacente des données, souvent à travers des représentations graphiques, telles que des tableaux, des graphiques et des statistiques descriptives, qui facilitent la visualisation des relations entre les variables (Hair et al., 2010).

Cette discipline, qui s'inscrit dans le cadre plus large de la statistique multi variée, a pour objectif principal de décrire, réduire, classer et clarifier les données en tenant compte de multiples points de vue. Elle aide à synthétiser une grande quantité d'informations en structures plus simples et compréhensibles, souvent représentées graphiquement, ce qui permet d'identifier les tendances, les similitudes, les différences et les liens entre les variables ou groupes de variables.

7. L'analyse descriptive

L'analyse descriptive est une branche de la statistique qui vise à résumer et à décrire les principales caractéristiques d'un ensemble de données. Elle utilise des mesures numériques et des représentations graphiques pour fournir une vue d'ensemble de la distribution des données, de leur tendance centrale et de leur dispersion (Hair et al., 2010).

Objectifs principaux :

- **Décrire les données** : L'analyse descriptive permet de présenter les données de manière claire et concise, en utilisant des mesures statistiques et des représentations graphiques.
- **Résumer les données** : Elle fournit des informations synthétiques sur les données, telles que la tendance centrale (moyenne, médiane, mode) et la dispersion (variance, écart-type).
- **Identifier les tendances et les modèles** : Elle aide à repérer les schémas et les relations dans les données, ce qui peut être utile pour comprendre les phénomènes étudiés.

7.1. Le mode

Le mode est la valeur distincte correspondant à l'effectif le plus élevé ; il est noté x_m .

a) Séries non groupées le mode est la valeur la plus fréquente dans une série d'observation.

b) Séries groupées

- Si les observations sont groupées en classe, une bonne estimation du mode est le point milieu de la classe de haute fréquence. Appelée classe modale ou classes.

7.2. La moyenne (arithmétique)

La moyenne ne peut être définie que pour une variable quantitative.

La moyenne est la somme des valeurs observées divisée par leur nombre, elle est notée \bar{x} :

$$\bar{X} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_i + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n n_i x_i$$

La moyenne peut être calculée à partir des valeurs distinctes et de leurs effectifs.

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n n_i x_i$$

7.3. Médiane

On appelle médiane d'une distribution, et on note "Me" la valeur de la variable partageant les observations classées par ordre croissant en deux groupes de même effectifs (50%).

La médiane d'un ensemble de nombre rangés par ordre croissant est :

* la valeur du milieu si le nombre des données est impaire

* la moyenne arithmétique des deux valeurs du milieu si le nombre des données est pair

7.4. Variance

La variance est la somme des carrés des écarts à la moyenne divisée par le nombre d'observations :

$$S_x^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

7.5. L'écart-type

L'écart-type est la racine carrée de la variance :

$$S_x = \sigma = \sqrt{s_x^2}$$

Quand on veut estimer l'écart-type d'une variable X partir d'un échantillon de taille n, utilise la variance "corrigée" pour définir l'écart type :

$$S_x = \sigma = \sqrt{s_x^2} = S_x \sqrt{\frac{n}{n-1}}$$

7.6. Corrélation

Le coefficient de corrélation est la covariance divisée par les deux écart-types marginaux :

$$r_{xy} = \frac{s_{xy}}{s_x s_y}$$

Le coefficient de détermination est le carré du coefficient de corrélation

$$r_{xy} = \frac{s_{xy}^2}{s_x^2 s_y^2}$$

7.7. Les quartiles

Les quartiles sont des valeurs qui divisent un ensemble de données triées en quatre parties égales. Chaque partie contient environ 25 % des données. Ils sont utilisés en statistique descriptive pour donner une idée de la répartition des données et de leur dispersion.

- **Premier quartile (Q1)** : Il sépare les 25 % des valeurs les plus basses des 75 % des valeurs les plus élevées.
- **Deuxième quartile (Q2)** : Il correspond à la médiane de l'ensemble de données. Il sépare les 50 % des valeurs les plus basses des 50 % des valeurs les plus élevées.
- **Troisième quartile (Q3)** : Il sépare les 75 % des valeurs les plus basses des 25 % des valeurs les plus élevées.

Calcule des quartiles:

1. **Trier les données** : La première étape consiste à trier les données par ordre croissant.

2. Calculer la position des quartiles :

- Pour Q1, la position est $(n + 1) / 4$, où n est le nombre de données.
- Pour Q2, la position est $(n + 1) / 2$.
- Pour Q3, la position est $3 * (n + 1) / 4$.

8. L'analyse de la variance (ANOVA)

ANOVA permet de déterminer s'il existe des différences statistiquement significatives entre plusieurs échantillons (plus de deux). Elle compare les moyennes et les variances des différents groupes pour identifier des variations entre eux. Contrairement au test t, qui se limite à la comparaison de deux échantillons, l'ANOVA évalue les différences entre trois groupes ou plus.

Il existe différents types d'analyse de la variance, les plus courants étant l'analyse de la variance à une voie (un facteur) et l'analyse de la variance à deux voies (deux facteurs), chacune pouvant être calculée avec ou sans mesures répétées.

L'analyse de variance à une voie (ANOVA à une voie) évalue l'influence d'une seule variable indépendante sur une variable dépendante de type métrique. Par exemple, elle permet de vérifier si le lieu de résidence (variable indépendante) a un impact sur le salaire (variable dépendante). Cependant, lorsque deux variables indépendantes sont prises en compte, il est nécessaire d'utiliser une analyse de variance à deux facteurs (ANOVA à deux facteurs). (DATAtab 2025)

L'analyse de variance à deux facteurs permet de vérifier s'il existe une différence entre plus de deux échantillons indépendants répartis entre deux variables ou facteurs.

ANOVA à un facteur

L'analyse de variance à un facteur est une extension du test t pour les groupes indépendants. Avec le test t, seuls deux groupes au maximum peuvent être comparés ; cette possibilité est désormais étendue à plus de deux groupes. Pour deux groupes ($k = 2$), l'analyse de variance est donc équivalente au test t. La variable indépendante est donc une variable à échelle nominale avec au moins deux valeurs caractéristiques. La variable dépendante est sur une échelle métrique. Dans le cas de l'analyse de la variance, la variable indépendante est appelée facteur.

Le but de l'ANOVA est d'expliquer autant de variances que possible dans la variable dépendante en la divisant en groupes.

Hypothèses de l'analyse de la variance

Hypothèse nulle H_0 : la valeur moyenne de tous les groupes est la même.

Hypothèse alternative H_1 : il existe des différences entre les valeurs moyennes des groupes.

ANOVA à deux facteurs

Comme son nom l'indique, l'analyse de la variance à deux facteurs examine l'influence de deux facteurs sur une variable dépendante. Elle étend l'analyse de variance à un facteur en y ajoutant un facteur supplémentaire, c'est-à-dire une variable indépendante supplémentaire à échelle nominale.

9. Modèle Multiple (Régression Linéaire Multiple)

Il s'agit d'un modèle mathématique comprenant une équation qui explique la valeur d'une variable dépendante (y) en fonction de l'influence d'un ensemble de k variables indépendantes (X_1, X_2, \dots, X_k). Cette relation peut être exprimée sous la forme $y=f(X_1, X_2, \dots, X_k)$, où $f(\cdot)$ représente une fonction spécifique reliant les variables.

Le modèle de régression multiple est considéré comme une extension et une généralisation du modèle de régression simple, qui ne traite qu'avec une seule variable indépendante. Le modèle linéaire multiple postule que la variable dépendante peut être exprimée comme une combinaison linéaire des variables indépendantes sélectionnées, avec l'ajout d'un terme représentant l'erreur aléatoire ou la perturbation. (Sami Mestiri , 2019)

Mathématiquement, le modèle linéaire multiple est exprimé par la formule suivante pour chaque observation i parmi un total de n observations :

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_p X_p + \epsilon \quad (1)$$

Où :

- Y est la variable dépendante,
- β_0 est l'intercept,
- $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$ sont les coefficients associés aux variables indépendantes X_1, X_2, \dots, X_p ,
- X_1, X_2, \dots, X_p sont les variables indépendantes,
- ϵ est le terme d'erreur.

L'objectif de la régression linéaire multiple est d'estimer les coefficients $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$ qui minimisent la somme des carrés des résidus (c'est-à-dire la différence entre les valeurs observées et prédites). Une fois que le modèle est ajusté, il peut être utilisé pour faire des prédictions sur la variable dépendante en fonction des valeurs des variables indépendantes.

9.1. Principes de l'analyse de régression

L'analyse de régression multiple repose sur plusieurs principes clés (Younsi,2025) :

Modélisation de la relation entre les variables : L'objectif principal de l'analyse de régression multiple est de modéliser la relation entre une variable dépendante et plusieurs variables indépendantes. On cherche à comprendre comment les variables indépendantes influencent la variable dépendante.

Choix des variables : Il est important de choisir judicieusement les variables à inclure dans le modèle. Les variables doivent être pertinentes pour la question de recherche et ne pas être fortement corrélées entre elles (pour éviter le problème de colinéarité).

Estimation des coefficients : L'analyse de régression multiple est basée sur la méthode des moindres carrés ordinaires, qui consiste à estimer les coefficients du modèle de sorte que la somme des carrés des résidus soit minimisée. Ces coefficients permettent de quantifier l'impact de chaque variable indépendante sur la variable dépendante, en tenant compte des autres variables du modèle.

Evaluation de l'ajustement du modèle : Plusieurs mesures sont utilisées pour évaluer l'ajustement du modèle, telles que le coefficient de détermination (R^2), qui indique la proportion de la variance de la variable dépendante expliquée par le modèle, ainsi que des tests d'hypothèses sur les coefficients pour déterminer leur significativité.

Interprétation des résultats : Une fois le modèle ajusté, il est important d'interpréter les résultats de manière appropriée. Cela implique de comprendre l'impact de chaque variable indépendante sur la variable dépendante, en tenant compte des autres variables du modèle.

Validation du modèle : Enfin, il est crucial de valider le modèle pour s'assurer qu'il est robuste et fiable. Cela peut se faire en utilisant des techniques telles que la validation croisée ou en divisant les données en un ensemble d'apprentissage et un ensemble de test.

En suivant ces principes, l'analyse de régression multiple peut fournir des informations précieuses sur la relation entre les variables et permettre de faire des prédictions utiles.

9.2. Calcul de régression linéaire multiple

Le modèle (1) peut aussi s'écrire sous forme matricielle $y = \beta X + \epsilon$ avec :

$$y = \begin{pmatrix} y_1 \\ \dots \\ y_n \end{pmatrix}; X = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{1p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{n1} & \dots & x_{np} \end{pmatrix}; \quad \beta = \begin{pmatrix} \beta_0 \\ \dots \\ \beta_p \end{pmatrix}; \quad \epsilon = \begin{pmatrix} \epsilon_1 \\ \dots \\ \epsilon_n \end{pmatrix} \quad (2)$$

Ainsi, y est un vecteur de longueur n , le nombre d'observations, la matrice X est de taille $n \times (p+1)$, b est un vecteur de longueur $p + 1$ et ϵ est un vecteur de longueur n .

Les paramètres $\{\beta_j\}_{j=0,\dots,p}$ et ϵ sont inconnus et à estimer à partir des n observations de $(x_{i1}, \dots, x_{ip}, y_i)$.

9.3. Estimation des paramètres du modèle

L'ensemble des paramètres à estimer sont estimés, comme en régression simple, par la méthode des moindres carrés. Il s'agit de trouver le « meilleur modèle » qui permet de prédire y à l'aide d'une combinaison linéaire des variables de X_i . On cherche donc les coefficients $\hat{\beta}_0, \dots, \hat{\beta}_p$ tels que :

$$\hat{y} = X\hat{\beta} = \sum_{j=0}^p \hat{\beta}_j x_j \text{ minimisant } \|y - X\beta\|^2.$$

On peut montrer que la solution matricielle est donnée par :

$$\hat{\beta} = (\hat{X}X)^{-1} \hat{X}y \quad (3)$$

9.4. Test de signification des coefficients en régression

On peut tester la significativité de la régression à l'aide d'un test portant sur l'ensemble des coefficients de régressions associés aux variables explicatives. Ce test, n'est réalisable que si les erreurs sont indépendantes, identiquement distribuées suivant une loi normale de moyenne 0 et d'écart-type σ .

Les hypothèses que l'on teste sont :

En régression simple : $H_0 : b = 0$ contre l'hypothèse alternative $H_1 : b \neq 0$.

En régression multiple : $H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_p = 0$ contre l'hypothèse alternative H_1 : Il existe au moins un coefficient β_j différent de 0.

10. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les notions fondamentales sur l'analyse des données. Nous avons abordé plusieurs méthodes d'analyse.

Dans le chapitre suivant, nous allons effectuer des expérimentations.

Chapitre 3 Conception et réalisation

1. Introduction

Ce chapitre présente le cadre méthodologique adopté pour mener l'étude sur les facteurs influençant la croissance des plantes. Il décrit l'environnement de l'étude, les espèces végétales choisies. Les méthodes utilisées pour l'analyse des données sont également détaillées, afin de garantir la reproductibilité et la fiabilité des résultats obtenus.

2. Objectif

L'objectif de ce projet de fin d'étude est de réaliser une étude comparative portant sur l'efficacité de différentes méthodes de fertilisation organique notamment le fumier de mouton traditionnel, le compost brûlé et l'*Azolla* séchée en analysant leur impact sur la croissance du blé et du tournesol, ainsi que leur potentiel à améliorer la fertilité des sols et à contribuer à une agriculture durable.

3. Dispositif Expérimental

Un essai en plein champ a été mené en appliquant différentes méthodes de fertilisation organique avant la plantation. Des parcelles témoins et des relevés réguliers sur la croissance des plantes et les conditions climatiques ont permis d'évaluer l'effet des traitements sur le tournesol. Dans la suite, nous présentant le dispositif expérimental :

- Les différentes méthodes de fertilisation ont été appliquées comme engrais de base avant la plantation des cultures.
- La dose d'engrais utilisée a été standardisée à l'aide d'un gobelet en plastique, correspondant à une unité de surface définie.
- Des parcelles témoins (T_0) ne recevant aucun apport organique, ont été intégrées à l'étude sur le tournesol afin de servir de base de comparaison pour évaluer l'effet des différents traitements.
- Des mesures régulières ont été effectuées sur les plantes, notamment la hauteur, afin de suivre leur dynamique de croissance.
- Les paramètres environnementaux, tels que la température de l'air, l'humidité relative et la vitesse du vent, ont également été enregistrés afin d'évaluer leur éventuel impact sur les résultats obtenus.

4. Description des données

Cette section est consacrée à la description détaillée des données collectées dans le cadre de cette étude. Elle présente les types de données mesurées ainsi que leur pertinence pour l'analyse de l'impact des différentes méthodes de fertilisation sur la croissance des cultures et les conditions environnementales associées.

Les données utilisées dans cette étude proviennent de l'Institut National de la Recherche Agronomique (Station de Recherche et d'Expérimentation Agricole d'Adrar). Elles concernent une culture semée en novembre 2024, dont le suivi a été réalisé de manière hebdomadaire tout au long du mois de février, correspondant ainsi aux différentes étapes du cycle de développement.

4.1. Données liées à la plantation du blé

Le tableau 1 présente les mesures préliminaires pour "Plante 1 = Blé fertilisation organique" et "Plante 2 = Blé fertilisation organique brûlée" sur quatre cycles (S1, S2, S3, S4).

Tableau 3 les résultats des mesures (Blé - Fertilisation organique / Fertilisation organique brûlée)

	Plante 1 = blé fertilisation organique				Plante 2 = blé fertilisation organique brûlé			
Cycles	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
Température extrême de l'air °C	13,5642857	16,3571429	18,5	17,3571429	13,5642857	16,3571429	18,5	17,3571429
Humidité relative de l'air U %	34,1428571	25,2857143	33,8571429	30,4285714	34,1428571	25,2857143	33,8571429	30,4285714
Vent	155,614286	152,985714	169,657143	162,371429	155,614286	152,985714	169,657143	162,371429
Hauteur (cm)	79	82	84	86	74	78	80	82

Les facteurs environnementaux :

Températures maximales de l'air (°C) : Les relevés de température de l'air sont identiques pour les deux types de plantes sur tous les cycles : 13,56 °C (S1), 16,36 °C (S2), 18,5 °C (S3), et 17,36 °C (S4). Cela indique que les deux groupes expérimentaux ont été exposés aux mêmes conditions de température ambiante.

Humidité relative de l'air (U %) : L'humidité relative de l'air est constante pour les deux types de plantes : 34,14 % (S1), 25,29 % (S2), 33,86 % (S3), et 30,43 % (S4). Cela indique des conditions d'humidité uniformes pour les deux groupes.

Vent: Les mesures de vent sont également identiques pour les deux types de blé sur tous les cycles, variant de 155,61 à 169,66 unités.

Rendement

Hauteur (cm) des blés

Le blé fertilisé organiquement (Plante 1) présente des hauteurs de 79 cm (S1), 82 cm (S2), 84 cm (S3), et 86 cm (S4). Tandis que le blé fertilisé avec de la matière organique brûlée (Plante 2) présente des hauteurs légèrement inférieures : 74 cm (S1), 78 cm (S2), 80 cm (S3), et 82 cm (S4).

Discussion : Il y a une tendance claire où le blé fertilisé avec de la matière organique (Plante 1) a constamment atteint des hauteurs plus importantes que le blé fertilisé avec de la matière organique brûlée (Plante 2) à travers toutes les sessions de mesure. Cela indique que la forme de fertilisation organique (brûlée contre non brûlée) a eu un impact sur la croissance (hauteur) des plants de blé, la fertilisation organique non brûlée apparaissant plus bénéfique pour le développement en hauteur.

4.2. Données liées à la plantation de tournesol

Les facteurs environnementaux tels que la température, l'humidité relative de l'air et le vent jouent un rôle crucial dans la croissance des plantes, y compris le tournesol. Voici une présentation de ces facteurs en relation avec la hauteur des tournesols dans les différentes conditions de fertilisation :

Tableau 4 Résultats des mesures préliminaires (Tournesol - Fertilisation organique / Fertilisation organique brûlée/ Tournesol - Azolla / Groupe témoin T₀)

	Tournesol fertilisation organique				Tournesol fertilisation organique brûlé				Tournesol fertilisation de l'AZOLA séchée				Tournesol Témoin (T ₀)			
Cycles	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
Température extrême de l'air °C	13,56429	16,35714	18,5	17,35714	13,56429	16,35714	18,5	17,35714	13,56429	16,35714	18,5	17,35714	13,56429	16,35714	18,5	17,35714
Humidité relative de l'air U %	34,14286	25,28571	33,85714	30,42857	34,14286	25,28571	33,85714	30,42857	34,14286	25,28571	33,85714	30,42857	34,14286	25,28571	33,85714	30,42857
Vent	155,6143	152,9857	169,6571	162,3714	155,6143	152,9857	169,6571	162,3714	155,6143	152,9857	169,6571	162,3714	155,6143	152,9857	169,6571	162,3714
Hauteur (cm)	117	122	129	135	101	107	113	120	104	110	117	122	100	105	111	117

Les facteurs environnementaux :

Températures maximales de l'air (°C) : Les températures varient entre 13,56 °C et 18,5 °C au cours des différents cycles. Ces températures semblent propices à la croissance du tournesol, car elles se situent généralement dans la plage acceptable pour cette plante.

Humidité relative de l'air (U %) : L'humidité relative influence la transpiration des plantes et, par conséquent, leur capacité à absorber l'eau et les nutriments. Les valeurs d'humidité relative varient entre 25,29 % et 34,14 %.

Vent: Le vent peut affecter la croissance des plantes en influençant la transpiration et en provoquant des dommages mécaniques. Les vitesses de vent observées (environ 152,99 à 169,66) sont modérées, ce qui peut être bénéfique pour la circulation de l'air tout en minimisant le stress sur les plantes.

Hauteur des Tournesols (cm) : Les hauteurs des tournesols varient selon les méthodes de fertilisation :

- **Fertilisation organique** : La hauteur maximale observée est de 135 cm.
- **Fertilisation organique brûlée** : La hauteur maximale est de 120 cm, ce qui est inférieur à celle de la fertilisation organique.
- **Fertilisation de l'AZOLA séchée** : La hauteur atteint 122 cm.
- **Témoin** : La hauteur atteint 117 cm.

Discussion : d'après les résultats obtenus, il semble que la fertilisation organique ait un impact positif sur la hauteur des tournesols par rapport aux autres méthodes. Les conditions environnementales, telles que la température, l'humidité et le vent, sont également favorables, ce qui pourrait contribuer à la croissance optimale des tournesols. Une analyse plus approfondie pourrait inclure d'autres facteurs comme la disponibilité des nutriments dans le sol et l'interaction entre ces variables pour mieux comprendre leur impact global sur la croissance des tournesols.

Dans la suite, nous allons présenter les données sous forme de graphique :

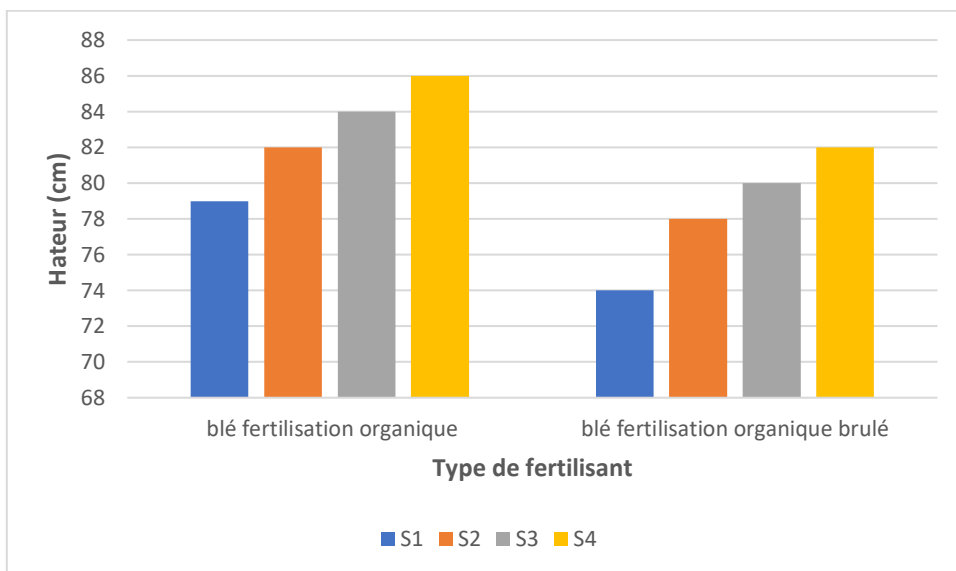


Figure 3 Représentation graphique de la hauteur de blé par rapport au type de fertilisant

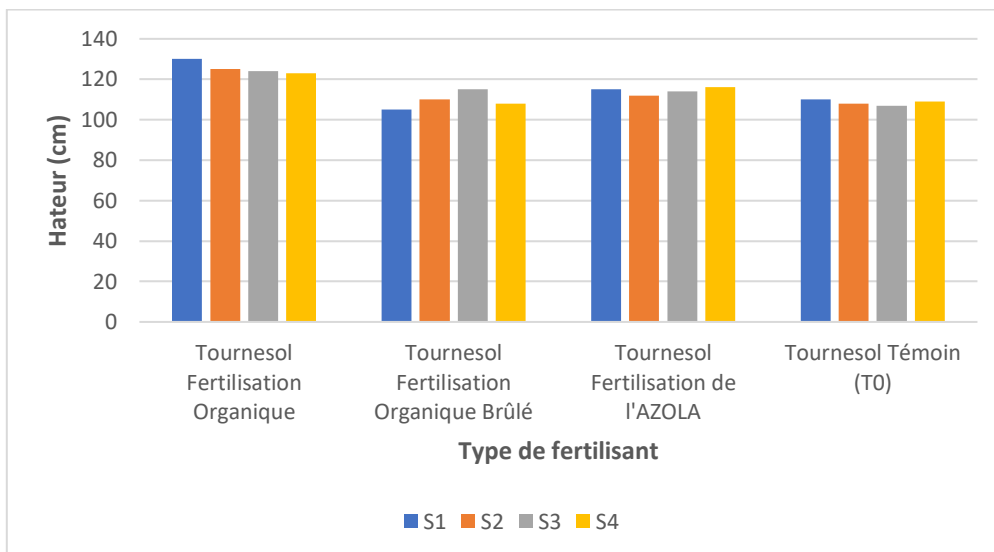


Figure 4 Représentation graphique de la hauteur de Tournesol par rapport au type de fertilisant

5. Analyse des Données

5.1. Analyse descriptive

5.1.1. Calcule de la moyenne

Pour calculer les moyennes des données fournies, nous allons examiner chaque paramètre (température, humidité, vent, hauteur) pour les différents types de fertilisation. Voici les calculs et les interprétations correspondantes.

a) *Température (°C)*

Calculs :

$$\text{Moyenne} : (13,56 + 16,36 + 18,50 + 17,36) / 4 = 16,45$$

Tableau 5 Calcul de la moyenne pour la température en °C pour chaque type de fertilisation.

	Blé fertilisation organique	Blé fertilisation organique brûlé	Tournesol fertilisation organique	Tournesol fertilisation organique brûlé	Tournesol fertilisation de l'AZOLA séchée	Tournesol Témoin
Moyenne	16,45	16,45	16,45	16,45	16,45	16,45

b) *Humidité Relative (%)*

Calculs :

$$\text{Moyenne} : (34,14 + 25,29 + 33,86 + 30,43) / 4 = 30,93$$

Tableau 6 Calcul de la moyenne pour l'humidité en % pour chaque type de fertilisation.

	Blé fertilisation organique	Blé fertilisation organique brûlé	Tournesol fertilisation organique	Tournesol fertilisation organique brûlé	Tournesol fertilisation de l'AZOLA séchée	Tournesol Témoin
Moyenne	30,3	30,3	30,3	30,3	30,3	30,3

c) *Vent (km/h)*

Calculs :

$$\text{Moyenne} : (155,61 + 152,99 + 169,66 + 162,37) / 4 = 165,16$$

Tableau 7 Calcul de la moyenne pour le vent en Km/h pour chaque type de fertilisation.

	Blé fertilisation organique	Blé fertilisation organique brûlé	Tournesol fertilisation organique	Tournesol fertilisation organique brûlé	Tournesol fertilisation de l'AZOLA séchée	Tournesol Témoin
Moyenne	165,16	165,16	165,16	165,16	165,16	165,16

d) *Hauteur (cm)*

Calculs statistiques de la hauteur totale :

$$\text{Moyenne} : (79 + 82 + 84 + 86 + 74 + 78 + 80 + 82 + 117 + 122 + 129 + 135 + 101 + 107 + 113 + 120 + 104 + 110 + 117 + 122) / 20 = 103,95$$

Tableau 8 Calcul de la moyenne pour la hauteur des plantes (en cm) pour chaque type de fertilisation.

Type de Fertilisation	Moyenne	Écart type
Blé Fertilisation Organique	82,75	2,98
Blé Fertilisation Organique Brûlé	78,5	3,41
Tournesol Fertilisation Organique	125,75	7,88
Tournesol Fertilisation Organique Brûlé	110,25	8,13
Tournesol Fertilisation de l'AZOLA	113,25	7,36

Interprétation des Résultats

— Température

La température moyenne est de 16,45 °C, ce qui est relativement modéré pour la culture, La médiane et les quartiles montrent une faible variation, indiquant des conditions climatiques stables.

— Humidité Relative

La moyenne d'humidité est de 30,93%, ce qui pourrait être considéré comme relativement bas pour certaines cultures, La médiane et les quartiles indiquent également une certaine variabilité, suggérant que certaines semaines peuvent être plus sèches que d'autres.

— Vent

La vitesse du vent moyenne est de 165,16 km/h, ce qui est assez élevé, Cela pourrait avoir des implications sur la pollinisation et la santé des plantes, surtout si le vent est trop fort.

— Hauteur

La hauteur moyenne des plantes est significativement plus élevée pour le tournesol (environ 117 cm) par rapport au blé (environ 81 cm), Cela est attendu, car le tournesol est généralement plus grand que le blé, La médiane et les quartiles montrent une large gamme de tailles, suggérant une croissance variée au sein des échantillons.

Dans la suite, nous illustrons des graphiques représentant la hauteur moyenne des deux plantes par rapport au type de fertilisant appliqué.

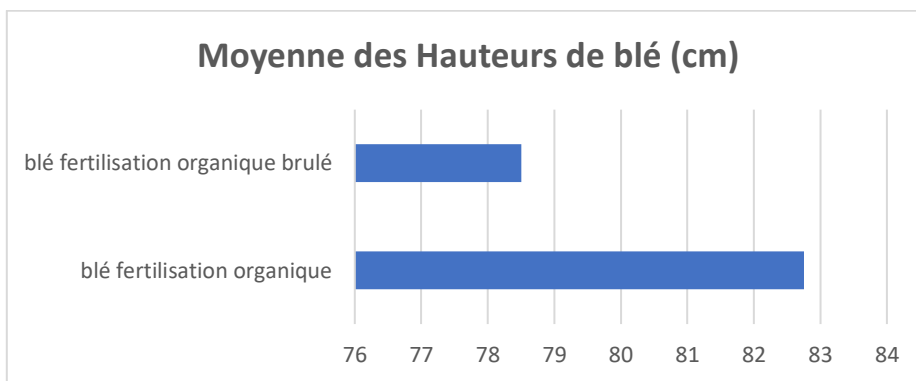


Figure 5 Illustration de moyenne des hauteurs (Blé)

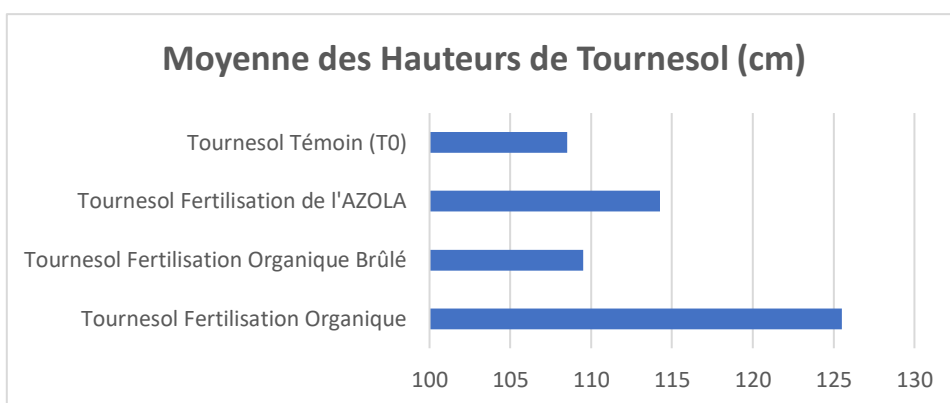


Figure 6 Illustration de moyenne des hauteurs (Tournesol)

Discussion

L'analyse des différents tableaux indique constamment l'impact significatif de la méthode de fertilisation sur la croissance (hauteur) des plantes, tandis que les facteurs environnementaux tels que la température, l'humidité et le vent sont restés constants tout au long des expériences.

Les résultats montrent que la fertilisation organique traditionnelle a eu un effet positif sur la croissance du blé, entraînant une augmentation de la hauteur des plantes par rapport au traitement avec du fumier organique brûlé, cela peut être attribué à une meilleure disponibilité de l'azote et d'autres nutriments essentiels dans le fumier de mouton et à ses effets bénéfiques sur la structure du sol.

Le fumier organique brûlé, bien que riche en certains éléments, a peut-être subi des pertes d'azote pendant la combustion, ce qui pourrait limiter son effet sur la croissance du blé,

Pour le tournesol, la fertilisation organique traditionnelle a également donné les meilleurs résultats en termes de hauteur de plante,

La fertilisation à l'Azolla séchée a montré un effet positif, bien que plus modeste, sur la hauteur du tournesol par rapport au groupe témoin, ce qui indique son potentiel en tant qu'engrais bénéfique. Par contre, les plantes sans fertilisation (T_0) montrent la croissance la plus faible, ce qui confirme l'importance de la fertilisation pour améliorer la productivité.

5.2. Analyse ANOVA

Dans la suite, nous allons effectuer l'analyse de Variance à un Facteur (ANOVA) pour déterminer si les différences de hauteur des plantes (blé et tournesol) sous différentes conditions de fertilisation sont statistiquement significatives :

5.2.1. Formulation des hypothèses

- **Hypothèse Nulle (H_0)** : Il n'y a pas de différences statistiquement significatives dans la hauteur moyenne des plantes entre les différentes conditions de fertilisation,
- **Hypothèse Alternative (H_1)** : Il existe des différences statistiquement significatives dans la hauteur moyenne des plantes entre les différentes conditions de fertilisation,

5.2.2. ANOVA pour le Blé

Calcul de la statistique de test observée :

- Nombre de groupes (k) = 2
- Nombre de mesures par groupe (n) = 4
- Nombre total de mesures (N) = 8

Somme des Carrés Inter-groupes (SCE) :

$$\begin{aligned} \text{SCE} &= \sum (n_i * (\bar{x}_i - \bar{x})^2) \\ &= 4 * (82,75 - 80,625)^2 + 4 * (78,5 - 80,625)^2 = 36,125 \end{aligned}$$

Somme des Carrés Intra-groupes (SCR) :

$$\text{SCR} = (n-1) * \text{var} = ((4-1) * 8,92) + ((4-1) * 11,67) = 61,75$$

Somme des Carrés Totaux (SCT) :

$$SCT = SCEL + SCR \Rightarrow SCT = 36,125 + 61,75 = 97,875$$

Degrés de liberté :

$$k - 1 = 2 - 1 = 1$$

$$N - k = 8 - 2 = 6$$

$$N - 1 = 8 - 1 = 7$$

Identification de seuil critique :

$$F_{\text{statistic}} = (SCE / (k-1)) / (SCR / (N-k)) = (36,125/1) / (61,75/6)$$

$$F_{\text{statistic}} = 3,51012$$

p-value : En utilisant la table de distribution de Fisher, on trouve que pour $F_{\text{crit}} = F_{(1;5;0,95)} = 5,987378$, $p\text{-value} = 0,110 (> 0,05)$.

Tableau 9 Tableau ANOVA a un facteur pour Blé

	n	\bar{X}	Var	SCR
Blé fertilisation organique	4	82,75	8,92	26,75
Blé fertilisation organique brûlé	4	78,5	11,67	35
		80,625		61,75

		dll
SCE	36,125	1
SCR	61,75	6
SCT	97,875	7

$$F_{\text{statistic}} = 3,51012146$$

Interprétation des Statistiques

— **F_{statistic} vs. F_{crit} :**

- La $F_{\text{statistic}} (3,510) < F_{\text{critic}} (5,987378)$, cela indique que la variation entre les groupes n'est pas suffisamment grande par rapport à la variation au sein des groupes pour conclure à une différence significative.

— **P-value :**

- La p-value (0.110138) est supérieure à 0.05, ce qui signifie que nous ne rejetons pas l'hypothèse nulle. Il n'y a pas de preuve statistique suffisante pour conclure que les moyennes des deux groupes sont différentes.

Implications Pratiques

- **Conséquences Agronomiques** : Les résultats suggèrent que les deux types de fertilisation (organique et organique brûlé) n'ont pas d'impact significatif sur la hauteur des plantes de blé. Cela pourrait indiquer que les agriculteurs peuvent choisir l'une ou l'autre méthode sans craindre un impact négatif sur la croissance.
- **Autres Facteurs à Considérer** : D'autres facteurs environnementaux ou de gestion (comme le type de sol, l'irrigation, la variété de blé, etc.) pourraient influencer la croissance des plantes et devraient être pris en compte dans des études futures.

5.2.3. ANOVA pour le Tournesol

Nombre de groupes (k) : 4

Nombre de mesures par groupe (n) : 4

Nombre total de mesures (N) : 16

Somme des Carrés Inter-groupes (SCE) :

$$SCE = \sum (n_i * (\bar{x}_i - \bar{x})^2)$$

$$SCE = 4*(125,75-117,75)^2 + 4*(110,25-117,75)^2 + 4*(113,25-117,75)^2 + 4*(108,25-117,75)^2$$

$$SCE = 740,75$$

Somme des Carrés Intra-groupes (SCR) :

$$SCR = (n-1) * var$$

$$SCR = ((4-1) * 62,25) + ((4-1) * 66,25) + ((4-1) * 62,25) + ((4-1) * 54,25)$$

$$SCR = 735$$

Somme des Carrés Totaux (SCT) :

$$SCT = SCE + SCR \Rightarrow SCT = 740,75 + 735 \Rightarrow SCT = 1475,75$$

Degrés de liberté :

$$k - 1 = 4 - 1 = 3$$

$$N - k = 16 - 4 = 12$$

$$N - 1 = 16 - 1 = 15$$

Identification de seuil critique (F_c):

$$F_{\text{statistic}} = (\text{SCE}/(k-1))/(\text{SCR}/(N-k)) \Rightarrow F=(740,75/3)/(735/12) \Rightarrow F \approx 4,031$$

p-value : En utilisant une table de distribution de Fisher, on trouve que pour $F_{\text{crit}} = F_{(3 ; 12 ; 0,95)} = 3,4903$, P-value = 0,0338 (< 0,05),

Tableau 10 Tableau ANOVA a un facteur pour Tournesol

	n	\bar{X}	Var	SCR
Tournesol fertilisation organique	4	125,75	62,25	186,75
Tournesol fertilisation organique brûlé	4	110,25	66,25	198,75
Tournesol fertilisation de l'AZOLA séchée	4	113,25	62,25	186,75
Tournesol Témoin T₀	4	108,25	54,25	162,75
		114,375		735

		dll
SCE	740,75	3
SCR	735	12
SCT	1475,75	15

$$F_{\text{statistic}} = 4,03129252$$

Interprétation des Statistiques

— **F_{statistic} vs. F_{crit}** :

○ La $F_{\text{statistic}} (4,03) > F_{\text{critic}} (3,49)$, cela confirme que la différence est significative.

— **P-value (0,0338)** : Cette valeur est inférieure au seuil de signification typique de 0,05 ce qui indique qu'il existe des différences significatives entre au moins deux des groupes de fertilisation. Cela signifie que nous rejetons l'hypothèse nulle (H_0), cela signifie que les différences de hauteur du tournesol entre les différentes conditions de fertilisation sont statistiquement significatives.

Les résultats de l'ANOVA indiquent qu'il existe des différences significatives dans la hauteur des tournesols en fonction du type de fertilisation utilisé. En particulier, la fertilisation organique semble être la plus efficace pour favoriser la croissance, tandis que le groupe témoin a la hauteur moyenne la plus basse.

5.3. La régression linéaire multiple

5.3.1. Simulation de données complémentaires

Dans le but de renforcer l'analyse statistique et de compenser le faible nombre d'observations réelles, une simulation de données complémentaires a été réalisée. Cette simulation repose sur l'utilisation de l'écart type des variables explicatives afin de générer des données synthétiques cohérentes avec la variabilité observée. Ces données simulées ont ensuite été intégrées dans une régression linéaire multiple, permettant d'évaluer la stabilité des relations entre les variables et d'améliorer la robustesse des résultats obtenus.

Le modèle de la régression linéaire peut être formulé comme suit :

$$\text{Hauteur} = \beta_0 + \beta_1 * \text{Température} + \beta_2 * \text{Humidité relative} + \beta_3 * \text{vent} + \varepsilon$$

On cherche à estimer les coefficients de l'équation de modèle à savoir : $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$.

Nous avons :

$$\begin{pmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{pmatrix} = (\hat{X} * X)^{-1} * (\hat{X} * Y)$$

D'où :

X : Matrice des données liées à la température, humidité et le vent.

\hat{X} : est transposé de la matrice X

Y : les valeurs de la hauteur de blé.

Pour simplifier les calculs, nous avons utilisé l'outil Excel version 2019 pour calculer la régression.

5.3.2. La régression linéaire multiple (Blé)

Afin de mener une régression linéaire multiple à partir des données disponibles, la hauteur des plantes de blé sera considérée comme variable dépendante. Les variables explicatives retenues pour modéliser cette hauteur sont la température, l'humidité relative de l'air, ainsi que la vitesse du vent. Ce choix vise à analyser l'effet combiné de ces facteurs climatiques sur la croissance des plants de blé.

Cas1 : Régression pour fertilisation organique

Pour le calcul de la régression linéaire multiple, nous avons utilisé la série de données illustrée par le tableau suivant :

Tableau 11 Tableau des données simulées (blé) avec fertilisation organique

Température	Humidité	Vent	Hauteur
15,67	38,26	163,08	81,99
13,56	34,14	155,61	79,00
11,45	30,02	148,14	76,01
18,47	29,41	160,45	84,99
16,36	25,29	152,98	82,00
14,25	21,17	145,51	79,01
20,61	37,98	177,13	86,99
18,50	33,86	169,66	84,00
16,39	29,74	162,19	81,01
19,47	34,55	169,84	88,99
17,36	30,43	162,37	86,00
15,25	26,31	154,90	83,01

Le tableau suivant, présente les données fournis par Excel 2019 :

Tableau 12 Résultats de la régression pour fertilisation organique

<i>Regression Statistics</i>	
Multiple R	0,931809
R Square	0,868268
Adjusted R Square	0,818868
Standard Error	1,579889
Observations	12

	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95,0%</i>	<i>Upper 95,0%</i>
Intercept	71,61365	24,5565	2,916281	0,019401	14,98627	128,241	14,98627	128,241
Température	1,573194	0,638913	2,462298	0,039178	0,099858	3,046529	0,099858	3,046529
Humidité	0,113576	0,258591	0,43921	0,672131	-0,48274	0,709887	-0,48274	0,709887
Vent	-0,11394	0,260018	-0,43819	0,672838	-0,71354	0,485664	-0,71354	0,485664

Les estimateurs du modèle sont :

$$\begin{pmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 71,61365 \\ 1,573194 \\ 0,113576 \\ -0,11394 \end{pmatrix}$$

En effet, le modèle de la régression est :

$$\text{Hauteur} = 71,61 + 1,57 * \text{Température} + 0,11 * \text{Humidité relative} - 0,11 * \text{vent}$$

Cas 2 : Régression pour fertilisation organique brûlé

Tableau 13 Tableau des données simulées (blé) avec fertilisation organique brûlé

Température	Humidité	Vent	Hauteur
15,67	38,26	163,08	77,42
13,56	34,14	155,61	74,00
11,45	30,02	148,14	70,58
18,47	29,41	152,98	81,42
16,36	25,29	152,98	78,00
14,25	21,17	152,98	74,58
20,61	37,98	169,66	83,42
18,50	33,86	169,66	80,00
16,39	29,74	169,66	76,58
19,47	34,55	162,37	85,42
17,36	30,43	162,37	82,00
15,25	26,31	162,37	78,58

Le tableau suivant, présente les données fournis par l'outil :

Tableau 14 Résultats de la régression pour fertilisation organique brûlé

<i>Regression Statistics</i>	
Multiple R	0,945809638
R Square	0,894555871
Adjusted R Square	0,855014323
Standard Error	1,616828901
Observations	12

	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95,0%</i>	<i>Upper 95,0%</i>
Intercept	60,7117	11,7130	5,18327	0,00083	33,7015	87,7220	33,7015	87,7220
t	943	2919	0129	9389	0056	8804	0056	8804
Température	1,62437	0,24222	6,70613	0,00015	1,06580	2,18293	1,06580	2,18293
Humidité	0,01763	0,11220	0,01571	0,98784	-	0,26050	-	0,26050
é	833	3697	9921	2807	0,25697	6023	0,25697	6023

					8357		8357	
Vent	-	0,09123	-	0,55593	-	0,15431	-	0,15431
	0,05606	2215	0,61453	2531	0,26644	6528	0,26644	6528
	5337		4427		7203		7203	

Le modèle de la régression est :

$$\text{Hauteur} = 60,71 + 1,62 * \text{Température} + 0,01 * \text{Humidité relative} - 0,06 * \text{vent}$$

Voici une interprétation détaillée des résultats de l'analyse de régression obtenus :

Statistiques de Régression

Multiple R : Cas1 = 0,931809 et cas 2= 0,945809638

Ce coefficient de corrélation multiple indique une relation positive forte entre la variable dépendante (hauteur des plants de blé) et les variables indépendantes (température, humidité et vent) pour les deux cas. Un R proche de 1 suggère que les variables indépendantes expliquent bien la variation de la variable dépendante.

R Square : Cas1 = 0,868268 et cas 2= 0,894555871

Environ **86,8%** (cas1) et **89,4%** (cas2) de la variance de la hauteur des plantes de blé est expliquée par les variables indépendantes dans le modèle. Cela signifie que le modèle a une capacité modérée à expliquer les variations dans la hauteur des plants.

Adjusted R : Cas1 = 0,818868 et cas 2= 0,855014323

Cet ajustement du R² prend en compte le nombre de variables indépendantes. Un R² ajusté de 81,8% (cas 1) et 85,5% (cas 2) indique que les deux modèles aient une certaine capacité explicative, ils sont robustes, même dans le cas où le nombre de variables indépendantes est élevé par rapport au nombre d'observations.

Standard Error: Cas1 =1,579889 et cas 2=1,616828901

Cela représente l'erreur standard de l'estimation, indiquant que, en moyenne, les prédictions des modèles diffèrent des valeurs observées d'environ 1,6 unités. Une erreur standard plus faible indique une meilleure précision des prédictions.

Observations : 12

Le modèle est basé sur 12 observations. Cela peut être considéré comme un échantillon relativement petit pour une régression linéaire multiple, ce qui peut affecter la fiabilité des résultats.

Coefficients

Intercept

C'est la valeur prédite de la hauteur des plantes lorsque toutes les variables indépendantes sont à zéro. Bien que ce ne soit pas toujours interprétable dans le contexte réel (par exemple, la température ne peut pas être zéro dans ce cas), cela donne un point de départ pour les prédictions.

Variables (Température, Humidité, Vent)

Chaque coefficient représente l'impact d'une unité d'augmentation dans la variable indépendante sur la variable dépendante. Par exemple, le coefficient de la température est positif, cela indique qu'une augmentation de la température est associée à une augmentation de la hauteur des plantes.

Standard Error : Indique l'incertitude autour de l'estimation du coefficient.

t Stat : Utilisé pour tester l'hypothèse nulle selon laquelle le coefficient est égal à zéro. Un t Stat élevé (en valeur absolue) indique que le coefficient est significativement différent de zéro.

P-value : Si la p-value est inférieure à 0,05, cela indique que la variable a un effet significatif sur la hauteur des plants de blé.

Lower 95% et Upper 95%: Ces valeurs représentent l'intervalle de confiance à 95% pour chaque coefficient. Si l'intervalle ne contient pas zéro, cela indique que le coefficient est significativement différent de zéro.

En effet, les résultats de cette analyse de régression fournissent des informations précieuses sur les facteurs qui influencent la hauteur des plants de blé.

5.3.3. La régression linéaire multiple (Tournesol)

Dans le cas du tournesol, la hauteur des plants sera également prise comme variable dépendante. Les variables climatiques telles que la température, l'humidité relative et la vitesse du vent seront utilisées comme facteurs explicatifs afin d'étudier leur influence conjointe sur le développement de cette culture. Cette approche permet de comparer les effets de ces conditions environnementales sur deux espèces végétales distinctes.

Nous allons procéder les mêmes étapes que la section précédente. Le tableau suivant récapitule toutes les données après la simulation. Il est a noté que les valeurs de l'écart type des hauteurs de plante utilisées sont comme suit :

σ (Fertilisation organique « F.O ») = 7,889867

σ (Fertilisation organique brulé « F.O,B ») = 8,13941

σ (Fertilisation de l'AZOLA séchée « A.S ») = 7,88975

σ (Témoïn « T₀ ») = 7,36546

Tableau 15 Tableau des données simulées (Tournesol) avec et sans fertilisation

Température	Humidité	Vent	Hauteur (F.O)	Hauteur (F.O,B)	Hauteur (A.S)	Hauteur (T ₀)
15,67	38,26	163,08	124,89	109,14	111,89	107,37
13,56	34,14	155,61	117,00	101,00	104,00	100,00
11,45	30,02	148,14	109,11	92,86	96,11	92,63
18,47	29,41	160,45	129,89	115,14	117,89	112,37
16,36	25,29	152,98	122,00	107,00	110,00	105,00
14,25	21,17	145,51	114,11	98,86	102,11	97,63
20,61	37,98	177,13	136,89	121,14	124,89	118,37
18,50	33,86	169,66	129,00	113,00	117,00	111,00
16,39	29,74	162,19	121,11	104,86	109,11	103,63
19,47	34,55	169,84	142,89	128,14	129,89	124,37
17,36	30,43	162,37	135,00	120,00	122,00	117,00
15,25	26,31	154,90	127,11	111,86	114,11	109,63

Le tableau suivant, présente les résultats obtenus :

Tableau 16 Résultats de la régression pour fertilisation F.O, F.O.B, A.S et T₀

<i>Regression Statistics</i>	F.O	F.O,B	A.S	T ₀
Multiple R	0,907528	0,90079	0,925731	0,90336
R Square	0,823607	0,811422	0,856978	0,81606
Adjusted R Square	0,757459	0,740705	0,803345	0,747082
Standard Error	4,830477	5,152498	4,349606	4,604876
Observations	12	12	12	12

	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95,0%</i>	<i>Upper 95,0%</i>
Intercept	74,8637 8629	75,0809 6734	0,99710 7375	0,34791 2179	- 98,2732 3487	248,000 8075	- 98,2732 3487	248,000 8075
Température	3,40478 2736	1,95346 2146	1,74294 7896	0,11950 766	- 1,09990 9049	7,90947 4522	- 1,09990 9049	7,90947 4522
Humidité	0,29712 7763	0,79063 6281	0,37580 8409	0,71682 8973	- 1,52608 277	2,12033 8295	- 1,52608 277	2,12033 8295
Vent	- 0,08926 1029	0,79499 8653	- 0,11227 8214	0,91336 897	- 1,92253 1209	1,74400 9151	- 1,92253 1209	1,74400 9151

Le modèle de la régression est :

$$\text{Hauteur} = 74,86 + 3,4 * \text{Température} + 0,3 * \text{Humidité relative} - 0,09 * \text{vent}$$

	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95,0%</i>	<i>Upper 95,0%</i>
Intercept	75,04919	80,0861 9	0,93710 5	0,37612 8	- 109,63	259,728 3	- 109,63	259,728 3
Température	3,943512	2,08368 8	1,89256 3	0,09505	- 0,8614 8	8,74850 5	- 0,8614 8	8,74850 5
Humidité	0,389304	0,84334 3	0,46161 9	0,65664 7	- 1,5554 5	2,33405 7	- 1,5554 5	2,33405 7
Vent	-0,26032	0,84799 7	- 0,30698	0,76669 6	- 2,2158	1,69516 5	- 2,2158	1,69516 5

Le modèle de la régression est :

$$\text{Hauteur} = 75,05 + 3,94 * \text{Température} + 0,39 * \text{Humidité relative} - 0,26 * \text{vent}$$

	<i>Coeffici</i>	<i>Standar</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower</i>	<i>Upper</i>	<i>Lower</i>	<i>Upper</i>
--	-----------------	----------------	---------------	----------------	--------------	--------------	--------------	--------------

	<i>ents</i>	<i>d Error</i>			95%	95%	95,0%	95,0%
Intercept	74,8637 8629	75,0809 6734	0,99710 7375	0,34791 2179	- 98,2732 3487	248,000 8075	- 98,2732 3487	248,000 8075
Température	3,40478 2736	1,95346 2146	1,74294 7896	0,11950 766	- 1,09990 9049	7,90947 4522	- 1,09990 9049	7,90947 4522
Humidité	0,29712 7763	0,79063 6281	0,37580 8409	0,71682 8973	- 1,52608 277	2,12033 8295	- 1,52608 277	2,12033 8295
Vent	- 0,08926 1029	0,79499 8653	- 0,11227 8214	0,91336 897	- 1,92253 1209	1,74400 9151	- 1,92253 1209	1,74400 9151

Le modèle de la régression est :

$$\text{Hauteur} = 74,86 + 3,4 * \text{Température} + 0,3 * \text{Humidité relative} - 0,09 * \text{vent}$$

Discussion et interprétation des résultats

Pour comparer et interpréter les résultats de la régression linéaire des quatre types de fertilisation, nous examinons les statistiques clés de chaque modèle en mettant l'accent sur les coefficients, le R², l'erreur standard, et les valeurs de p.

Statistiques de Régression

a) Multiple R et R²

Pour A.S: Multiple R = 0,926, R² = 0,857

Pour F.O.B: Multiple R = 0,903, R² = 0,816

Pour T₀: Multiple R = 0,908, R² = 0,824

Pour F.O: Multiple R = 0,901, R² = 0,811

Interprétation :

Un R² plus élevé indique un meilleur ajustement du modèle. AS présente le meilleur ajustement avec un R² de 0,857, ce qui signifie que 85,7 % de la variance de la variable dépendante est expliquée par le modèle. Les autres modèles (F.O.B, T₀, et F.O) montrent également un bon ajustement, mais légèrement inférieur.

b) Erreur Standard

Pour Fertilisation de l'AZOLA séchée: 4,35

Pour Fertilisation organique brûlé: 4,60

Pour T₀: 4,83

Pour Fertilisation organique : 5,15

Interprétation :

Une erreur standard plus faible indique une plus grande précision des prédictions. Fertilisation de l'AZOLA séchée a l'erreur standard la plus basse, ce qui est un indicateur positif.

ANOVA des modèles

Tous les modèles montrent une signification F très faible ($p < 0.05$), indiquant que les modèles sont significatifs.

Coefficients

a) Intercept et Coefficients des Variables

Fertilisation de l'AZOLA séchée :

- Intercept = 60,47
- Température = 3,49 ($p = 0,083$)
- Humidité = 0,23 ($p = 0,756$)
- Vent = -0,07 ($p = 0,922$)

b) Fertilisation organique brûlé:

- Intercept = 68,35
- Température = 3,36 ($p = 0,108$)
- Humidité = 0,32 ($p = 0,686$)
- Vent = -0,16 ($p = 0,841$)

c) T₀:

- Intercept = 74,86
- Température = 3,40 ($p = 0,120$)
- Humidité = 0,30 ($p = 0,717$)
- Vent = -0,09 ($p = 0,913$)

d) Fertilisation organique :

- Intercept = 75,05

- Température = 3,94 ($p = 0,095$)
- Humidité = 0,39 ($p = 0,657$)
- Vent = -0,26 ($p = 0,767$)

Les coefficients de température sont positifs, indiquant une relation positive avec la variable dépendante, mais aucun d'entre eux n'est significatif ($p > 0,05$) sauf pour Fertilisation de l'AZOLA séchée, qui est proche de la signification,

Les coefficients pour l'humidité et le vent ne montrent pas d'effet significatif dans aucun des cas.

En conclusion de cette analyse, nous constatons que la fertilisation de l'AZOLA séchée est le modèle le plus performant, avec le meilleur ajustement et la plus faible erreur standard, Cependant, tous les modèles montrent que la température a un effet positif, mais aucun des coefficients n'est statistiquement significatif. Les variables d'humidité et de vent n'ont pas montré d'influence significative sur la variable dépendante dans les quatre cas.

En général, bien que les modèles soient significatifs dans leur ensemble, les variables explicatives individuelles nécessitent une attention particulière pour comprendre leur impact,

6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons réalisé une analyse des données portant sur deux cultures, à savoir le blé et le tournesol. Une analyse descriptive a été conduite, suivie d'une analyse de variance (ANOVA) visant à évaluer l'effet des différents traitements de fertilisation sur la croissance des plantes.

La régression linéaire multiple nous a permis d'évaluer l'effet combiné de plusieurs variables sur la hauteur des plantes de blé/tournesol, En interprétant les coefficients et les valeurs de signification, nous avons pu identifier l'impact des facteurs les plus influents sur la croissance des plantes et prendre des décisions éclairées pour optimiser les pratiques agricoles.

Conclusion Générale

En conclusion, l'objectif de ce projet de fin d'étude est d'analyser l'impact de plusieurs paramètres sur la hauteur du blé et du tournesol, Ces deux cultures jouent un rôle essentiel dans la sécurité alimentaire et la rotation des cultures, Le blé constitue une source de base pour l'alimentation humaine, tandis que le tournesol contribue à la production d'huile végétale de qualité, Les résultats obtenus offrent une meilleure compréhension des facteurs influençant leur croissance, permettant d'optimiser les pratiques culturales pour améliorer les rendements,

En outre, cette étude met en évidence l'impact significatif de la méthode de fertilisation sur la croissance des plantes, en particulier la hauteur, Selon les résultats obtenus, la fertilisation organique traditionnelle s'est avérée la plus bénéfique pour la croissance du blé et du tournesol, probablement en raison d'une meilleure disponibilité des nutriments et de ses effets positifs sur la structure du sol, La perte d'azote pendant la combustion pourrait limiter l'efficacité du fumier organique brûlé, L'Azolla séchée a également démontré un potentiel en tant qu'engrais bénéfique pour le tournesol, même si son effet est plus modeste, Enfin, la croissance la plus faible observée chez les plantes sans fertilisation (T_0) confirme l'importance de la fertilisation pour améliorer la productivité agricole,

Suggestions pour des études futures

- **Augmenter la Taille de l'échantillon** : Avoir plus d'observations pourrait donner une meilleure puissance statistique et aider à détecter des différences plus petites,
- **Examiner d'autres variables** : Inclure d'autres facteurs, tels que le pH du sol, les niveaux de nutriments, ou même des conditions climatiques, pourrait fournir des informations supplémentaires sur les performances des différentes méthodes de fertilisation,
- **Répétitions et durée** : Répéter l'expérience sur plusieurs saisons pourrait aider à évaluer la consistance des résultats

Bibliographie

- Awika, J. (2011). Major cereal grains production and use around the world. In: *Advances in Cereal Science: Implications to Food Processing and Health Promotion*, American Chemical Society, pp. 1–13.
- Bekkari, S. (2022). *La céréaliculture dans la région de Ziban: La conduite culturale et son cout cas du blé dur dans la daïra de Zeribet El Oued* [Master's thesis, Université Mohamed Khider Biskra].
- Bozzini A., 1988-Origin, distribution, and production of durum Wheat in the world. Fabriani G. et C. *lintas.durum: chemistry and technologies*. AACC.P1-16.
- Brink, M., & Belay, G. (Eds.). (2006). *Plant resources of tropical Africa 1: Cereals and pulses*. PROTA Foundation.
- Chekhma, M., Hachimi, F. Z., & Aib, Y. (2020). *Monoculture et culture en association—céréales * légumineuses—: Fertilisation minérale et biologique*.
- Clarke J. et Norvell F.-2002-Concentration of cadmium and other éléments in the grain of near-isogenic durum lines. *Can. J. Plant Sci/ revue canadienne de phytotechnie*. 82p.
- DataTab. (n.d.). *ANOVA*. Retrieved June, 2025, from <https://datatab.fr/tutorial/anova>
- Dupont, F. M., & Altenbach, S. B. (2003). Molecular and biochemical impacts of environmental factors on wheat grain development and protein synthesis. *Journal of Cereal Science*, 38(2), 133–146.
- Feillet, P. (2000). *Le grain de blé : composition et utilisation*. INRA. Paris.
- Gordeyeva, Y., Shelia, V., Shestakova, N., Amantayev, B., Kipshakbayeva, G., Shvidchenko, V., Aitkhozhin, S., Kurishbayev, A., & Hoogenboom, G. (2024). Sunflower (*Helianthus annuus*) Yield and Yield Components for Various Agricultural Practices (Sowing Date, Seeding Rate, Fertilization) for Steppe and Dry Steppe Growing Conditions. *Agronomy*, 14(1), 36.
- Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., & Anderson, R. E. (2010). *Multivariate data analysis* (7th ed.). Pearson.
- Hayes, A. (2024, June 27). *Descriptive statistics: Definition, overview, types, and examples*. Investopedia. https://www.investopedia.com/terms/d/descriptive_statistics.asp

- Institut Technique des Grandes Cultures (2007).
- Lebart, L., Morineau, A., & Piron, M. (2006). *Statistique exploratoire multidimensionnelle*. Dunod.
- Mestiri, S. (2021, December). *Le modèle de régression linéaire multiple* [Presentation]. ResearchGate.
- Mouelhi, B., Slim, S., Arfaoui, S., Boussalmi, A., & Ben Jeddi, F. (2016). Effet du mode de semis et de la rotation culturale sur les paramètres de croissance et les composantes de rendement du blé dur (*Triticum durum* Desf.). *Journal of New Science*.
- Nathaliegontard. (2017). Un peu de géographie. Association des sélectionneurs français (asf).
- Qualtrics. (n.d.). *Qu'est-ce qu'un test t de Student ?* Retrieved June, 2025, from <https://www.qualtrics.com/fr/gestion-de-l-experience/etude-marche/test-t-student/>
- Razi, S. (2018). *Cours de céréaliculture*
- Silva, J. V., van Heerwaarden, J., Reidsma, P., Laborte, A. G., Tesfaye, K., & van Ittersum, M. K. (2023). Big data, small explanatory and predictive power: Lessons from random forest modeling of on-farm yield variability and implications for data-driven agronomy. *Field Crops Research*, 302, 109063.
- Taiz, L., & Zeiger, E. (2010). *Plant Physiology* (5th ed.). Sinauer Associates, Sunderland, MA.
- Younsi. F.Z. Modélisation, Informatique et logiciels. Support de cours, Master Aménagement Hydro-agricole, 2024/2025