



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar El-Oued
Faculté des Sciences de la Nature et de la vie
Département de Biologie

Mémoire Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master en Ecologie
Spécialité: Biodiversité et Environnement

Thème:

***Valorisation Des Déchets De Coquilles D'œufs Dans La Conservation
De L'écosystème***

Présenté par les étudiant :

BELAID Alima

KHEDOUDJI Sourour

Devant le jury composé de:

Promotric: Dr.BEN AMOR Safia Ecole Supérieure d'Agriculture Saharienne à El Oued

Co-promotrice Dr.LEBBIHI Raouia Ecole Supérieure d'Agriculture Saharienne à El Oued

Président Dr.ALLIAT Moufida Soussan Université de Echahid Hamma Lakhdar El-Oued

Examineur:Dr.LAABED Soumaia Université de Echahid Hamma Lakhdar El-Oued

Anné universitaire:2025/2026

Remercîment

Je rends grâce à Dieu Tout-Puissant qui m'a guidée sur le chemin du savoir, m'a ouvert les portes de la connaissance et m'a accordé la volonté ainsi que la force nécessaire pour mener à bien ce travail. Louange à Lui, par la grâce duquel les bonnes œuvres s'accomplissent.

J'exprime ma profonde reconnaissance à mes chères enseignantes, Dr. BEN AMOR Safia et Dr. LEBBIHI Raouia, de l'École Supérieure d'Agriculture d'El Oued, pour leur encadrement bienveillant et pour avoir accepté également de discuter ce mémoire. Je leur suis infiniment reconnaissante pour leur savoir, leurs précieux conseils et leur soutien constant, sans lesquels ce travail n'aurait pas pu être mené à terme. Qu'elles trouvent ici l'expression de mon respect et de ma gratitude les plus sincères.

Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude à Dr. ALLIAT Mofida Soussen, de l'Université Chahid Hamma Lakhdar – El Oued, Présidente du jury, pour l'honneur qu'elle m'a fait en acceptant de présider cette soutenance. Je lui adresse mes plus sincères remerciements et lui témoigne mon profond respect.

J'adresse également mes sincères remerciements à Dr. LAABED Soumia, de l'Université Chahid Hamma Lakhdar – El Oued, examinatrice, pour avoir accepté de faire partie du jury de ce mémoire. Je lui suis reconnaissante pour l'intérêt qu'elle a porté à ce travail ainsi que pour ses remarques et suggestions constructives qui contribueront à son amélioration et à son enrichissement.

Je tiens également à remercier l'ensemble des enseignants et le personnel du laboratoire pour leur aide précieuse et pour m'avoir fourni les moyens matériels indispensables à la réalisation de la partie expérimentale de ce mémoire.

Je remercie également tous mes enseignants de la faculté, en particulier ceux du département de Biodiversité et Environnement, pour la qualité de leur enseignement, leur patience et leur générosité dans la transmission du savoir tout au long de mon parcours universitaire.

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements aux membres du jury, qui ont accepté d'évaluer ce travail modeste, de lui consacrer leur temps précieux et de l'enrichir par leurs observations constructives. J'espère que ce mémoire sera à la hauteur de leurs attentes.

Je remercie également toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à

l'achèvement de ce travail, et leur exprime toute ma reconnaissance

Dédicace

Nous dédions le fruit de ce modeste travail à ceux qui ont été pour nous un soutien et un appui dans cette vie, à nos très chers parents, qui ne nous ont jamais privé de leurs prières et de leurs encouragements tout au long de notre parcours académique.

Nous dédions également cet effort à nos chers enseignants, qui ont été pour nous de précieux guides et aides, et qui n'ont ménagé aucun effort pour nous accompagner et nous orienter.

Nous le dédions aussi à tous ceux qui ont partagé avec nous cette étape, amis et camarades, et qui ont été à nos côtés dans les moments de sérieux et de travail.

Enfin, nous le dédions à nous-mêmes, en reconnaissance de la patience et de la persévérance que nous avons fournies pour parvenir à ce résultat. Louange à Dieu pour le succès et la réussite.

Alima et Sourour

المخلص

يمثل تثمين النفايات العضوية والكتل الحيوية الطبيعية اليوم نهجاً واعداً لتطوير زراعة مستدامة وصديقة للبيئة. وفي هذا السياق، أنجزت هذه الدراسة بهدف تقييم تأثير تركيبات مختلفة قائمة على مسحوق قشور البيض، والسبيرولينا (*Spirulina platensis*)، وحمض التانيك على القدرة الإنباتية والنمو الأولي للقمح الصلب (*Triticum durum*).

تم تحويل قشور البيض إلى مسحوق ناعم بعد غسلها وطحنها، في حين استُخدمت السبيرولينا التجارية وحمض التانيك لتحضير سبعة عشر معاملة تجريبية طُبقت على بذور القمح الصلب. وأُجريت اختبارات الإنبات في أطباق بتري تحت ظروف مضبوطة لمدة عشرة أيام. وتم تقييم نسبة الإنبات ونمو البادرات، كما حُللت البيانات المتحصل عليها باستخدام منهجية أسطح الاستجابة (RSM) وتحليل التباين (ANOVA).

أظهرت النتائج أن المعاملات تؤثر بشكل معنوي في إنبات البذور ونمو البادرات. وقد سُجلت أفضل النتائج في المعاملتين T6 و T7، حيث بلغ معدل الإنبات الأقصى 82.67 %، إلى جانب نمو ملحوظ للبادرات. وتميزت هذه التركيبات بانخفاض تركيز السبيرولينا، مع وجود تراكيز متوسطة أو مرتفعة من مسحوق قشور البيض، وتراكيز منخفضة من حمض التانيك.

في المقابل، أدت التراكيز المرتفعة من السبيرولينا إلى انخفاض واضح في القدرة الإنباتية. وكشف التحليل الإحصائي عن جودة ممتازة لملاءمة النموذج التربيعي، بمعامل تحديد مرتفع ($R^2 = 0.9905$)، مما يؤكد موثوقية التنبؤات. كما تبين أن التفاعلات بين العوامل المختلفة كانت ذات دلالة إحصائية، مما يبرز أهمية تحقيق التوازن بين التراكيز المستخدمة.

وتسلط النتائج المتحصل عليها الضوء على الإمكانيات الواعدة للمدخلات الحيوية الطبيعية المستمدة من النفايات القابلة للتحلل الحيوي والكتل الحيوية الطحلبية، باعتبارها بديلاً بيئياً للأسمدة التقليدية. وتسهم هذه المقاربة في تثمين النفايات العضوية وتطوير استراتيجيات زراعية مستدامة قادرة على تحسين إنبات المحاصيل الحيوية ونموها المبكر.

الكلمات المفتاحية:

القمح الصلب (*Triticum durum*)؛ السبيرولينا؛ مسحوق قشور البيض؛ حمض التانيك؛ الإنبات؛ الزراعة المستدامة.

Abstract

The valorization of organic waste and natural biomass has emerged as a promising approach for the development of sustainable and environmentally friendly agriculture. In this context, the present study was conducted to evaluate the effect of different formulations based on eggshell powder, spirulina (*Spirulina platensis*), and tannic acid on the germination capacity and early growth of durum wheat (*Triticum durum*). Eggshells were processed into a fine powder after washing and grinding, while commercial spirulina powder and tannic acid were used to prepare seventeen experimental treatments applied to durum wheat seeds. Germination tests were carried out in Petri dishes under controlled conditions for ten days. Germination percentage as well as seedling growth parameters were evaluated, and the obtained data were analyzed using Response Surface Methodology (RSM) and Analysis of Variance (ANOVA). The results showed that the treatments significantly influenced seed germination and seedling growth. The best results were obtained with treatments T6 and T7, which exhibited a maximum germination rate of 82.67% along with considerable seedling growth. These formulations were characterized by low concentrations of spirulina combined with moderate to high amounts of eggshell powder and low concentrations of tannic acid. In contrast, high spirulina concentrations caused a marked reduction in germination capacity. Statistical analysis revealed an excellent fit of the quadratic model with a high determination coefficient ($R^2 = 0.9905$), confirming the reliability of the predictions. Significant interactions among the studied factors highlighted the importance of maintaining an optimal balance between the applied concentrations. The obtained findings demonstrate the potential of natural bio-inputs derived from biodegradable waste and algal biomass as eco-friendly alternatives to conventional fertilizers. This approach contributes to organic waste valorization and to the development of sustainable agricultural strategies capable of improving seed germination and early growth of cereal crops.

Keywords: *Triticum durum*; Spirulina; eggshell powder; tannic acid; germination; sustainable agriculture.

Sommaire

Introduction Générale	12
------------------------------	-----------

Chapitre I : Revue bibliographiques	15
--	-----------

<i>I.I. Les coquilles d'œufs : Structure, composition chimique et valorisation durable en agriculture biologique</i>	16
--	-----------

I.I.1. Structure des coquilles d'œufs	17
---------------------------------------	-----------

I.I.1.1. Matrice calcifiée	18
----------------------------	-----------

I.I.1.2. Cuticule externe et périostre	19
--	-----------

I.I.2. Composition chimique	19
-----------------------------	-----------

I.I.2.1. Phase minérale : carbonate de calcium	20
--	-----------

I.I.2.2. Composants de la matrice organique	20
---	-----------

I.I.2.3. Oligo-éléments et contaminants	20
---	-----------

I.I.3. Technologies de recyclage	21
----------------------------------	-----------

I.I.3.1. Approches de recyclage chimique et minérale	21
--	-----------

I.I.3.2. Approches de recyclage biologique	22
--	-----------

I.I.3.3. Valorisation mécanique et matérielle	23
---	-----------

I.I.4. Le rôle des coquilles d'œufs dans l'agriculture biologique	23
---	-----------

I.I.5. Utilisations des coquilles d'œufs dans la fertilisation biologique	25
---	-----------

<i>I.II. La spiruline : composition bioactive, propriétés biologiques et applications agricoles durables</i>	25
--	-----------

I.II. 1. Taxonomie et composition	26
-----------------------------------	-----------

I.II.2. Composition en macronutriments	26
--	-----------

I.II.2. Composés bioactifs	27
----------------------------	-----------

I.II.3. Effets biologiques et mécanismes	27
--	-----------

I.II.3.1. Activité antioxydante	28
---------------------------------	-----------

I.II.3.2. Effets immunomodulateurs	29
------------------------------------	-----------

I.II.3.3. Effets sur le métabolisme et la régulation lipidique	29
--	-----------

I.II.3.4. Propriétés anti-inflammatoires	29
--	-----------

I.II.4. Rôles écologiques de la spiruline dans les systèmes aquatiques et terrestres	30
--	-----------

I.II.4.1. Production phototrophique et fixation du carbone	31
--	-----------

I.II.4.2. Interactions avec les communautés microbiennes	32
--	-----------

I.II.4.3. Adaptations environnementales et résilience	32
---	-----------

I.II.5. Applications agricoles de la spiruline	33
--	-----------

I.II.5.1. Amendement du sol et fertilisation	33
I.II.5.2. Stimulation de la croissance des cultures	33
Chapitre II: Matériels et Méthodes	
II.1. Objectifs de l'étude	36
II.2. Présentation générale de l'étude	36
II.3. Matériel végétal	37
II.4. Préparation des poudres et des solutions	37
II.4.1. Poudre de coquille d'œuf	37
II.4.2. Poudre de la spiruline	38
II.4.3. Acide tannique	39
II.5. Préparation des mélanges	39
II.6. Test de germination	40
II.7. Mesure des paramètres de croissance	41
II.8. Analyse statistique	42
Chapitre III: Résultats et Discussion	
III.1. Résultats	44
III.1.1. Effet des différents traitements sur la croissance des plantules de blé dur	44
III.1.2. Analyse statistique du pourcentage de germination	47
III.1.2.1. Analyse descriptive et comparaison des valeurs expérimentales et prédites	47
III.1.2.2. Évaluation de la performance du modèle RSM et des paramètres statistiques d'ajustement	48
III.1.2.3. Analyse de la variance (ANOVA) et identification des facteurs significatifs	49
III.1.2.4. Validation du modèle par corrélation entre valeurs expérimentales et prédites	50
III.1.2.5. Diagnostic des résidus et validation des hypothèses du modèle	51
III.1.2.6. Effet de l'interaction Spiruline – ESP sur le pourcentage de germination (surface de réponse 3D)	52
III.1.2.7. Effet de l'interaction Spiruline – ESP sur le pourcentage de germination (surface de réponse 3D)	54
III.1.2.8. Effet de l'interaction ESP – Acide tannique et identification du point optimal	55
III.2. Discussion	56
Conclusion	60
Références	63

Liste des tableaux

Tableau II.1: Les principales concentrations testées dans l'expérimentation	40
Tableau III.1 : Évolution de la croissance des plantules de blé dur (<i>Triticum durum</i>) traitées par différents mélanges de spiruline, poudre de coquille d'œuf et acide tannique pendant 10 jours d'incubation	45
Tableau III.2 : Valeurs expérimentales et valeurs prédites du pourcentage de germination du blé dur obtenues par le modèle RSM.....	47
Tableau III.3 : Paramètres statistiques d'évaluation et de validation du modèle quadratique RSM appliqué au pourcentage de germination de <i>Triticum durum</i>	49
Tableau III.4 : Analyse de variance (ANOVA) du modèle quadratique appliqué au pourcentage de germination du blé dur.....	50

List des figures

Figure .I.1. La structure de la coquille d'œuf (Pillai et al., 2023)	17
Figure .I.2: Composition bioactives de la spiruline (Bortolini et al., 2022).....	26
Figure .I.3: Bienfaits pour la santé d'une supplémentation en spiruline (Bobescu et al., 2020).....	28
Figure .I.4: Perspectives d'une économie circulaire de la spiruline pour la gestion environnementale et des énergies renouvelables (Musa et al., 2025).....	31
Figure .I.5: Utilisation de la spiruline pour la croissance végétale (Agnol et al., 2021).....	34
Figure II.1 : La variété de blé dur utilisé dans l'expérimentation <i>Triticum durum</i> (Originale, 2026)	37
Figure II.2 : La poudre de coquille utilisés dans l'expérimentation (Originale, 2026).....	38
Figure II.3 : La poudre de spiruline utilisée dans l'expérimentation (Originale, 2026)	38
Figure II.4 : Préparation de mélange utilisé pour le test de la germination (Originale, 2026).....	39
Figure II.5 : Protocole d'application de traitement (Originale, 2026).....	41
Figure III.1 : Graphique de corrélation entre les valeurs expérimentales (Actual) et les valeurs prédites (Predicted) du pourcentage de germination de <i>Triticum durum</i> par le modèle RSM.....	51
Figure III.2 : Graphique de distribution des résidus en fonction des valeurs prédites du pourcentage de germination de <i>Triticum durum</i> . La dispersion aléatoire des points à l'intérieur des limites de contrôle supérieure (+3) et inférieure (-3) confirme l'homoscédasticité (constance de la variance) et valide l'absence de biais systématique dans le modèle RSM.....	52
Figure III.3 : Surface de réponse en 3D représentant l'effet de l'interaction entre la concentration en Spiruline (A) et la quantité de poudre de coquille d'œuf (B) sur le pourcentage de germination de <i>Triticum durum</i> (pour une concentration fixe en acide tannique C = 0,01 g).....	53
Figure III.4 : Surface de réponse en 3D représentant l'effet de l'interaction entre la concentration en Spiruline (A) et la quantité d'acide tannique (C) sur le pourcentage de germination de <i>Triticum durum</i> (pour une quantité fixe de poudre de coquille d'œuf B = 0,8 g).....	54
Figure III.5 : Surface de réponse en 3D représentant l'effet de l'interaction entre la quantité de poudre de coquille d'œuf (B) et la concentration en acide tannique (C) sur le pourcentage de germination de <i>Triticum durum</i> (pour une concentration fixe en Spiruline A = 0,6 g).....	56

Introduction Générale

Dans un contexte mondial caractérisé par une augmentation de la production de déchets organiques et par la nécessité de promouvoir des pratiques agricoles durables, la valorisation des sous-produits biologiques constitue actuellement une approche prometteuse pour atténuer l'impact environnemental, tout en favorisant l'amélioration de la fertilité des sols et de la productivité végétale. Parmi ces déchets, les coquilles d'œufs revêtent une importance significative en raison de leur prévalence ainsi que de leur richesse en carbonate de calcium et en éléments minéraux essentiels. Souvent perçues comme des déchets dépourvus de valeur, ces substances peuvent néanmoins être réutilisées dans divers secteurs, en particulier en agriculture biologique, où elles participent à l'amélioration des caractéristiques physicochimiques du sol et à l'apport de calcium indispensable à la croissance des végétaux (Ahmed et al., 2021; Gautron et al., 2021).

Les coquilles d'œufs se composent essentiellement de carbonate de calcium sous forme de calcite, qui constitue environ 95 % de leur composition, en plus d'une proportion marginale de protéines, de polysaccharides et d'autres composés organiques (Moreau et al., 2022). En raison de leur structure poreuse et de leur richesse minérale, ces éléments possèdent des caractéristiques propices à l'amélioration de la structure du sol, à la régulation du pH, ainsi qu'à l'apport d'éléments nutritifs essentiels à la croissance des plantes (Kulshreshtha et al., 2024). Par ailleurs, leur réutilisation s'inscrit dans les principes de l'économie circulaire, qui vise à convertir les déchets biodégradables en ressources agricoles à valeur ajoutée (Gautron et al., 2021).

Parallèlement, la spiruline (*Spirulina platensis*), une microalgue cyanobactérienne de teinte bleu-vert, suscite un intérêt croissant dans les secteurs de l'agriculture, de l'alimentation et des biotechnologies en raison de sa remarquable richesse nutritionnelle. Elle renferme plus de 60 % de protéines, ainsi que des vitamines, des acides aminés essentiels, des minéraux, des pigments naturels et une multitude de composés bioactifs dotés de propriétés antioxydantes, anti-inflammatoires et immunomodulatrices (Fais et al., 2022; Khan et al., 2005). De nombreuses recherches ont révélé que la spiruline peut fonctionner en tant que biofertilisant et biostimulant naturel, favorisant ainsi la germination des graines, le développement végétatif et la résistance des plantes face aux stress environnementaux (Al-Ramamneh, 2024; Indhumathi & Ramya, 2020).

La spiruline présente également une activité antioxydante significative, attribuée à la présence de phycocyanine, de composés phénoliques et de caroténoïdes, qui ont la capacité de neutraliser les radicaux libres et de protéger les cellules contre le stress

oxydatif (Chu et al., 2010). Dans le domaine de l'agriculture, son emploi sous forme d'extraits ou de poudre a révélé des effets bénéfiques sur diverses cultures, en particulier en ce qui concerne l'accroissement du rendement et l'optimisation de la croissance des plantules (Rojas et al., 2017).

L'acide tannique, un composé phénolique naturel largement présent dans le règne végétal, constitue également une substance d'une grande importance dans le cadre des systèmes agricoles durables. Reconnu pour ses propriétés antioxydantes et antimicrobiennes, cet agent peut jouer un rôle dans la régulation de certains mécanismes physiologiques des plantes lorsqu'il est appliqué à des concentrations faibles. Son association avec des biomasses naturelles et des amendements organiques pourrait, de ce fait, accroître l'efficacité biologique des traitements visant à favoriser la germination et la croissance des plantes.

Le blé dur (*Triticum durum*), considéré comme une culture stratégique dans les régions méditerranéennes, et plus particulièrement en Algérie, représente une ressource alimentaire de première importance. La germination constitue une phase essentielle du cycle de développement des plantes, car elle conditionne la capacité des graines à engendrer des plantules robustes et uniformes. Ce processus est tributaire de divers facteurs environnementaux, parmi lesquels figurent la disponibilité en eau, la composition minérale du milieu ainsi que la présence de substances bioactives susceptibles d'influer tant positivement que négativement sur les mécanismes physiologiques de la graine.

Dans cette optique, l'emploi conjoint de poudre de coquille d'œuf, de spiruline et d'acide tannique se présente comme une alternative écologique prometteuse aux engrais chimiques traditionnels. Cette démarche a pour objectif non seulement de valoriser les déchets organiques ainsi que les biomasses naturelles, mais également de favoriser des pratiques agricoles qui respectent l'environnement et s'alignent sur les principes de l'agriculture durable.

Le présent travail vise ainsi à évaluer l'impact de diverses formulations composées de poudre de coquille d'œuf, de spiruline et d'acide tannique sur le potentiel germinatif du blé dur (*Triticum durum*). Plus précisément, cette étude a pour objectif de valoriser les déchets de coquilles d'œufs en tant que source naturelle de calcium et d'éléments minéraux, d'analyser l'impact de la spiruline sur la germination et la croissance précoce des plantules,

d'examiner l'effet de l'acide tannique, ainsi que de déterminer la formulation la plus efficace pour optimiser les paramètres de germination et de croissance végétale. Cette expérimentation participe donc à l'élaboration de solutions écologiques novatrices fondées sur la valorisation des ressources naturelles ainsi que des déchets biodégradables, dans le contexte de l'économie circulaire.

Ce mémoire de fin d'étude est présenté sous forme de chapitres. Elle est composée d'une introduction générale suivie par trois chapitres et terminée par une conclusion générale.

- ❖ La première partie est consacré à la revue bibliographique qui comporte deux chapitres afin d'avoir une vue générale sur la coquille d'œuf et leurs applications, dans le deuxième chapitre une synthèse des travaux effectués sur la spiruline, leurs classifications, compositions et des propriétés physicochimiques, biologiques.
- ❖ La deuxième partie est consacrée à l'étude expérimentale qui comporte les objectifs de notre projet de mémoire, une présentation générale du matériel et des méthodes utilisés lors de cette étude, et présentation détaillée des résultats au cours de ce travail et leur discussion en rapport avec des données bibliographiques en Algérie et à travers le monde.

Chapitre I : Revue bibliographiques

1.1. Les coquilles d'œufs : Structure, composition chimique et valorisation durable en agriculture biologique

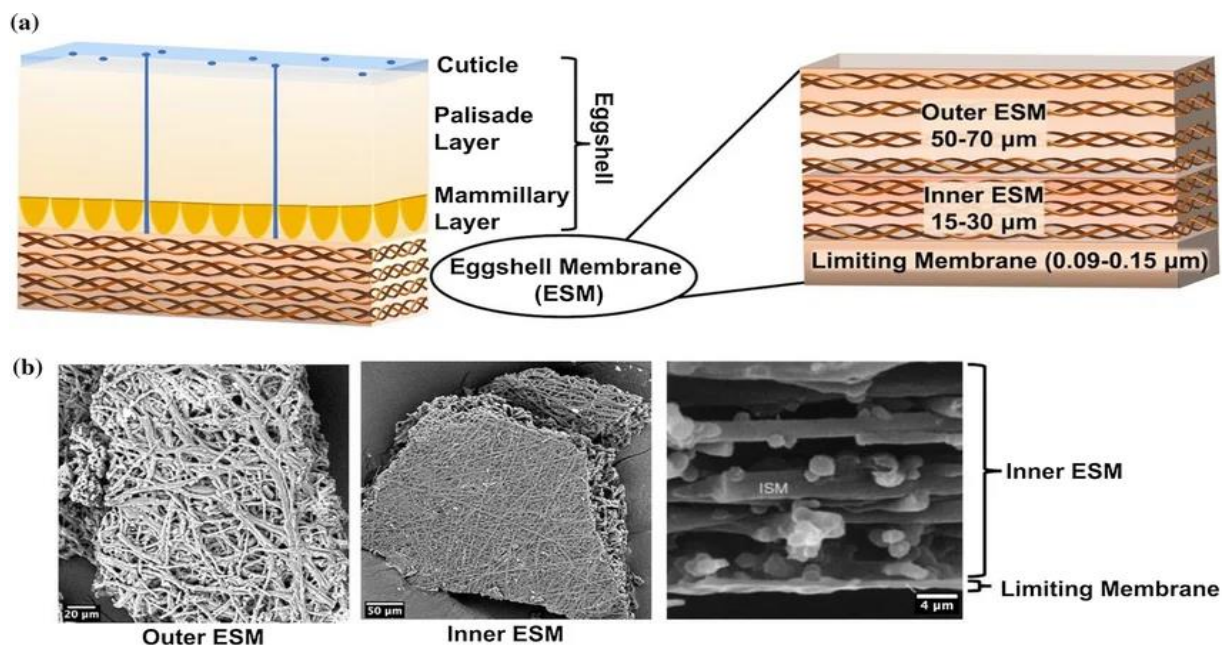
La production annuelle de coquilles d'œufs est en hausse. Les avantages écologiques et économiques de leur réutilisation en tant que matériaux de substitution sont considérables. Des méthodes de recyclage existent déjà. Afin d'identifier scientifiquement les alternatives les plus prometteuses pour réduire les déchets de coquilles d'œufs, il est impératif d'étudier un large éventail de filières de recyclage. Le carbonate de calcium est le principal composant des coquilles d'œufs. Il s'agit d'un déchet abondant issu des industries de transformation des œufs et des élevages avicoles. Plus de la moitié des déchets mondiaux liés aux œufs sont constitués de coquilles d'œufs, qui sont principalement éliminées après l'incubation. Leur taux de production mondial élevé, leur toxicité négligeable et leur faible degré de contamination lors de la transformation en font des matériaux parfaitement adaptés au recyclage. La coquille d'œuf aviaire constitue la couche externe de l'embryon et joue un rôle essentiel dans l'identification de l'espèce, la respiration et la protection de l'embryon. La taille, la forme et la couleur des embryons varient considérablement. La coquille représente une part importante de la masse totale de l'œuf. Chez les œufs de volaille, le poids de la coquille représente environ 10 à 11 % de la masse totale de l'œuf (Gautron et al., 2021).

Les coquilles d'œufs suscitent un intérêt croissant en tant que ressource issue des déchets, en raison de la pénurie d'espaces de mise en décharge, des limites de l'incinération et d'autres technologies d'élimination, ainsi que de la volonté de développement durable. Elles trouvent des applications dans divers domaines, notamment les catalyseurs industriels, la lutte contre la pollution, la production de biocarburants, ainsi que les matériaux de construction et l'ingénierie. L'incorporation de coquilles d'œufs dans le béton cellulaire et la stabilisation de l'argile a été étudiée. Elles améliorent l'efficacité des réacteurs à biomasse, favorisent la dégradation catalytique des composés organiques et adsorbent le phosphore présent dans les eaux usées (Wang et al., 2021). Les coquilles d'œufs sont capables de former des interactions chimiques stables avec l'adsorbat, ce qui leur permet d'adsorber efficacement le phosphate sur une large plage de pH. L'utilisation des coquilles d'œufs comme amendements de sol et engrais entraîne la libération de phosphate dissous en raison de leur forte teneur en nutriments. Les coquilles d'œufs constituent des adsorbants précieux grâce aux trois couches de matériaux céramiques qui composent leur structure : ischiatique, poreuse (calcaire) et lamellaire. Cette structure comporte un nombre important d'ouvertures (environ 7 000 à 17

000), ce qui élimine la nécessité d'un traitement de surface avant utilisation. Par conséquent, les œufs transforment les déchets en produits bénéfiques (Buksh et al., 2018).

I.1.1. Structure des coquilles d'œufs

Les coquilles des œufs d'oiseaux, tout comme celles de certains reptiles et monotrèmes, remplissent de nombreuses fonctions, agissant comme une barrière protectrice essentielle qui enveloppe l'embryon pendant son développement. Les coquilles d'œufs d'oiseaux servent d'interface poreuse pour les échanges gazeux, permettant l'échange d'oxygène et de dioxyde de carbone entre l'embryon et l'environnement extérieur. Les coquilles d'œufs facilitent l'adsorption et l'échange de divers ions et constituent une réserve durable de calcium pour l'embryon en croissance. Les coquilles d'œufs d'oiseaux sont composées d'environ 95 % de carbonate de calcium sous la forme cristalline de la calcite, les 5 % restants comprenant une matrice organique diversifiée qui inclut des polysaccharides, plus de 30 protéines distinctes, des protéoglycanes et des lipides. La cuticule, située à la surface externe de la coquille, sert de barrière principale contre les maladies microbiennes. La couche cuticulaire se compose de divers lipides, de glycoprotéines et d'une réserve supplémentaire de phosphore pour le poussin en développement (Gautron et al., 2021).



(a):Schéma de la structure de la coquille d'œuf.

(b):Montre des image microscopiques des membranes de la coquille d'œuf.

Figure I.1. La structure de la coquille d'œuf (Pillai et al., 2023)

I.I.1.1. Matrice calcifiée

Les coquilles des œufs d'oiseaux, tout comme celles de certains reptiles et monotrèmes, remplissent de nombreuses fonctions, agissant comme une barrière protectrice essentielle qui enveloppe l'embryon pendant son développement. Les coquilles d'œufs d'oiseaux servent d'interface poreuse pour les échanges gazeux, permettant l'échange d'oxygène et de dioxyde de carbone entre l'embryon et l'environnement extérieur. Les coquilles d'œufs facilitent l'adsorption et l'échange de divers ions et constituent une réserve durable de calcium pour l'embryon en croissance. Les coquilles d'œufs d'oiseaux sont composées d'environ 95 % de carbonate de calcium sous la forme cristalline de la calcite, les 5 % restants comprenant une matrice organique diversifiée qui inclut des polysaccharides, plus de 30 protéines distinctes, des protéoglycanes et des lipides. La cuticule, située à la surface externe de la coquille, sert de barrière principale contre les maladies microbiennes. La couche cuticulaire se compose de divers lipides, de glycoprotéines et d'une réserve supplémentaire de phosphore pour le poussin en développement (Ahmed et al., 2022).

La structure des coquilles d'œufs résulte de processus de calcification des œufs fossilisés dans des conditions environnementales similaires. Cette structure a été analysée tant au niveau macroscopique que microscopique, et les propriétés physiques des coquilles d'œufs ont été quantifiées. Les premières données issues de l'étude des œufs fossilisés indiquent que la matière constituant les coquilles d'œufs s'est conservée au-delà de la période prévue (Venter, 2026).

La formation de la coquille d'œuf commence dans l'ovaire par l'assemblage de macromolécules et se poursuit jusqu'à l'ovulation ; le blanc d'œuf et la coquille d'œuf sont des accumulations observables avant la ponte. La calcification de la coquille d'œuf se produit dans l'utérus et s'effectue dans des conditions humides. Les coquilles d'œufs aviaires contemporaines se composent de six couches distinctes : la membrane protéique interne, la couche mamillaire, la couche palissadique, la couche calcifiée externe et la cuticule externe. Les œufs fossilisés présentent les quatre premières couches ; le développement de la couche calcifiée externe se produit rapidement ; plusieurs heures après la ponte, la membrane interne commence à se calcifier partiellement. La structure des coquilles d'œufs contient des informations précieuses sur le cycle de vie (Liu et al., 2024).

I.I.1.2. Cuticule externe et périostre

Une coquille d'œuf se compose, de l'intérieur vers l'extérieur, de deux membranes, d'une matrice calcifiée, d'une cuticule externe et d'un périostracum (Moreau et al., 2022). La cuticule externe se forme en deuxième lieu lors de la formation de la coquille, après l'achèvement du dépôt de la matrice calcifiée. Le périostracum est principalement constitué de protéines fibreuses et est synthétisé de manière endogène par les poules pondeuses (Fujii, 1969). La cuticule externe et le périostracum de la coquille sont essentiels pour protéger le contenu interne et réguler la perméabilité aux gaz et à la vapeur d'eau tout au long du développement de l'œuf.

La cuticule externe contient jusqu'à 55 % de protéines en poids, le reste étant constitué de polysaccharides, de phospholipides et de traces d'autres composés chimiques (Gautron et al., 2021). La cuticule est reconnue comme une barrière naturelle primaire empêchant les bactéries de pénétrer à l'intérieur de l'œuf. La cuticule externe est présente mais présente une épaisseur réduite et un revêtement lipidique négligeable dans les premiers œufs pondus par les poules, ce qui indique que la cuticule externe appliquée sur la coquille après la ponte sert de barrière protectrice contre l'infiltration bactérienne, tandis qu'une cuticule intacte déposée lors de la ponte initiale semble non essentielle à la fécondation de l'œuf (de Szalay & Wertz, 2023).

I.I.2. Composition chimique

La coquille d'œuf de poule se compose principalement d'une phase minérale de carbonate de calcium (CaCO_3) et d'un composant organique qui remplit plusieurs fonctions dans le développement de la coquille. Bien que d'autres polymorphes du carbonate de calcium soient présents, le minéral de la coquille d'œuf se présente exclusivement sous forme de calcite à température ambiante (Gautron et al., 2021), qui est la variante la plus stable sur le plan thermodynamique. La coquille d'œuf d'oiseau est largement reconnue pour ses qualités mécaniques exceptionnelles, en particulier par rapport à d'autres matériaux biologiques ou structures synthétiques (Moreau et al., 2022). Une coquille d'œuf de poule domestique standard comprend environ 94 à 95 % en poids de minéraux et environ 5 % en poids de matière organique. Les principaux constituants organiques sont les protéines et les polysaccharides, qui influencent la précipitation des cristaux de carbonate de calcium au cours de la biominéralisation. Le dépôt de la phase minérale et l'inclusion simultanée de la matrice

organique se produisent en 75 à 80 minutes, ce qui correspond à 18 à 26 heures au sein d'un cycle de ponte standard de 24 heures.

I.I.2.1. Phase minérale : carbonate de calcium

Selon Gautron et al. (2021), la phase minérale des coquilles d'œufs aviaires est constituée de carbonate de calcium, principalement sous forme de calcite. La calcite est le polymorphe le plus stable à température ambiante. Dans une certaine mesure, près de 95 % des œufs proviennent de volailles domestiques. Il s'agit de minéraux de nature inorganique lorsque l'on prend en compte les membranes. Partout dans le monde, les échantillons de coquilles d'œufs prélevés parmi un large éventail de couleurs de coquilles et de minéraux sont calcitiques. De plus, 95 % de chaque coquille d'œuf est constituée de carbonate de calcium, la calcite étant la forme la plus courante de carbonate de calcium dans la nature. Le quartz, le talc, le feldspath, la dolomite, la pyrite, la smectite et le limon font partie des autres minéraux qui ont été trouvés dans certaines coquilles d'œufs. Ces minéraux sont considérés comme des impuretés de la matière constituant la coquille d'œuf (Lammie, 2006).

I.I.2.2. Composants de la matrice organique

Les coquilles d'œufs d'oiseaux sont principalement constituées d'un matériau minéral renforcé mécaniquement par une matrice organique, ce qui garantit le bon développement et l'éclosion des embryons aviaires. La coquille des œufs de poules domestiques est composée d'environ 95 % de matière inorganique, le reste étant constitué de matrice organique. La composante minérale est constituée d'environ 94 à 95 % de carbonate de calcium (CaCO_3) et de 1 à 2 % d'autres ions, notamment Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Cl^- et P (Gautron et al., 2021). On trouve dans la nature trois variétés cristallines de CaCO_3 : l'aragonite, la calcite et la vaterite. Néanmoins, les coquilles d'œufs aviaires sont composées de la phase trigonale du CaCO_3 , appelée calcite. La calcite est une substance très stable qui se forme rapidement, en moins de 20 heures, à température physiologique (48 °C) à partir du carbonate d'ammonium produit par uréolyse (Lammie, 2006). La calcite se dépose sur la surface externe de la membrane de la coquille d'œuf en association avec des protéines et d'autres macromolécules, que l'on désigne collectivement sous le nom de matrice organique. On pense que la matrice organique remplit diverses fonctions mécaniques, notamment celle de faciliter la fusion des cristaux et d'agir comme agent mouillant pendant la phase initiale de la biominéralisation (Fu et al., 2025).

I.I.2.3. Oligo-éléments et contaminants

La coquille d'œuf fait office de barrière protectrice entre le blanc d'œuf et l'environnement. Les coquilles sont pauvres en micro-éléments et oligo-éléments, en plus des macro-éléments. Bien que les œufs et leurs composants constituent des compléments nutritifs à l'alimentation quotidienne, ils contiennent également des substances dangereuses (Cristea et al., 2023). Les oligo-éléments sont présents sous forme organique et inorganique. Les oligo-éléments organiques sont nettement plus facilement assimilables que leurs homologues inorganiques. L'arsenic, le plomb, le mercure, le cadmium et l'antimoine sont les cinq éléments classés comme toxiques.

La teneur en minéraux, en particulier en oligo-éléments, est influencée par la composition de l'alimentation, et dépend également de l'espèce de la poule et de son origine géographique. Les modes de consommation, tels que l'utilisation alimentaire de préparations humiques organiques ou inorganiques, influencent également les oligo-éléments (Kim et al., 2022).

I.1.3. Technologies de recyclage

Les actualités relatives à l'économie circulaire suscitent l'optimisme quant à un avenir durable. Néanmoins, l'urgence de boucler les cycles des matières est accentuée par la consommation croissante de ressources. Les déchets biologiques, tels que les coquilles d'œufs, qui sont riches en composés calciques et produits en quantités importantes (Sacia, 2009), offrent des possibilités de recyclage. Les cadres européens et britanniques révisés en matière de déchets, qui accordent la priorité à la prévention, à la réutilisation et au recyclage, ont suscité un regain d'intérêt politique et académique (Wang et al., 2021).

Le recyclage des coquilles d'œufs, qui fait l'objet d'une attention croissante, est l'un des éléments des politiques de bioéconomie circulaire, qui visent à concilier écologie et économie. De nouvelles applications pour ces matériaux dans les secteurs du recyclage biologique, chimique et minéral, ainsi que de la valorisation mécanique, sont rendues possibles par l'allongement de la durée de vie technique de nombreux produits et l'intérêt croissant pour l'économie circulaire. Les coquilles d'œufs peuvent servir de vecteurs d'énergie intégrés dans des dispositifs microbiologiques alimentant diverses chaînes de substrats, ou d'amendements de sol à base d'oligo-éléments minéraux purs. Elles sont capables de modifier de manière bénéfique les microcycles urbains à un coût relativement faible en termes de matériaux, d'énergie ou d'infrastructures (Sacia, 2009).

I.1.3.1. Approches de recyclage chimique et minérale

Le calcium et le carbonate de calcium constituent les principaux composants chimiques des coquilles d'œufs. Par conséquent, les déchets alimentaires et autres déchets industriels contenant du calcium constituent la cible principale des techniques de recyclage chimique, qui visent à récupérer le calcium et ses composés. Les cendres de boues d'épuration activées à haute ou basse température constituent une matière première alternative potentielle pour remplacer les coquilles d'œufs dans l'extraction du calcium. L'avantage de l'utilisation des cendres de boues réside dans le fait que leur séchage nécessite moins d'énergie que celui des coquilles d'œufs, bien que la consommation d'énergie dépende de la teneur en humidité des boues (Wang et al., 2021). Les coquilles d'œufs peuvent également être extraites du compost issu des déchets alimentaires. Les coquilles d'œufs broyées sont utilisées comme matériau d'ajustement du pH respectueux de l'environnement pour réguler les fluctuations de pH pendant les opérations de compostage. Les coquilles d'œufs sont employées par de nombreuses usines de biogaz dans les grandes exploitations laitières pour neutraliser les effluents laitiers acides et garantir la production de biogaz (Segneanu et al., 2023).

I.1.3.2. Approches de recyclage biologique

Les coquilles d'œufs peuvent être utilisées dans une grande variété d'applications grâce à la diversité de leurs composants. Afin de produire des matériaux à valeur ajoutée, de nombreuses méthodes reposent sur le recyclage biologique.

L'inactivation des micro-organismes présents dans la structure et capables d'opérer une dégradation biologique résulte de la déshydratation des coquilles d'œufs à température élevée. Après une préparation conventionnelle, les œufs de volaille peuvent être incorporés dans l'alimentation des volailles sans nécessiter de traitements ni de désinfectants supplémentaires. La structure et la composition des coquilles d'œufs peuvent être modifiées par l'application de diverses méthodes de chauffage, ce qui permet de transformer des sous-produits biologiques en matières premières de valeur. Les coquilles d'œufs sont principalement composées de carbonates de calcium et d'une couche protectrice organique riche en carbone (Wang et al., 2021).

De plus, les œufs de poule sont consommés partout dans le monde ; il est donc envisageable d'associer des poudres de coquilles d'œufs de poule et des nutriments issus de la volaille pour la construction de routes biologiques dans les zones extra-urbaines.

Un gramme de coquille d'œuf de poule moulue suffit à couvrir environ 69 % de l'apport quotidien recommandé en calcium pour un jeune enfant, car la coquille d'œuf de poule

contiendrait environ 360 à 400 mg de calcium par gramme. Lorsque l'apport en sodium est limité et que l'alimentation contient moins de 30 g de protéines animales, le complément de calcium issu de la coquille d'œuf atteint ou dépasse l'apport quotidien recommandé. Les coquilles sont stérilisées et désinfectées par ébullition dans l'eau, une méthode de désinfection pratique largement utilisée. La distribution d'équipements de base, d'ustensiles ménagers et des informations nécessaires à la préparation permet de promouvoir auprès des populations rurales d'Afrique subsaharienne cette source peu coûteuse de complément alimentaire en calcium et les méthodes de préparation pour la consommation humaine (Bartter et al., 2018a).

I.1.3.3. Valorisation mécanique et matérielle

La classification des méthodes de recyclage des coquilles d'œufs dépend des matériaux qui en sont extraits à l'issue du processus de traitement. Le recyclage mécanique, méthode la plus répandue et la plus ancienne, est généralement plus économe en énergie et moins coûteux (Owuamanam et al., 2021). Il consiste à broyer et à moudre les résidus de coquilles en particules de la taille souhaitée. Par conséquent, les matériaux agrégés à base de coquilles peuvent être utilisés comme : (i) additifs pour les matrices de polymères et de ciment, (ii) biofertilisants à valeur ajoutée, et (iii) pigments géologiques et architecturaux. Une évaluation récente des stratégies de gestion des déchets a mis en évidence le potentiel des coquilles d'œufs à être converties en matériaux de remplissage adaptés aux composites à base de chlorure de polyvinyle (Skórczewska et al., 2022).

La valorisation est également possible pour les résidus de coquilles d'œufs non récupérables issus du traitement mécanique de surface ou de la transformation de coquilles d'œufs pré-fonctionnalisées en nouveaux matériaux polymères. Les coquilles d'œufs peuvent être transformées en une variété de produits grâce à des techniques telles que le broyage, le séchage par atomisation, la calcination ou le broyage à billes. Les deux principaux domaines de recherche sur le recyclage des coquilles d'œufs sont le recyclage du chlorure de polyvinyle et l'utilisation de la poudre dérivée des coquilles d'œufs.

I.1.4. Le rôle des coquilles d'œufs dans l'agriculture biologique

Les coquilles d'œufs sont largement reconnues comme un moyen potentiel d'améliorer la productivité tout en préservant les ressources dans les systèmes d'agriculture biologique. Les études sur leur utilisation portent principalement sur la fertilisation (apport de nutriments, chaulage, amélioration de la rhizosphère) et sur les stratégies de lutte contre les ravageurs, y compris le recyclage des déchets et la mise en place de barrières. Les coquilles d'œufs

constituent une alternative au modèle du jetable qui est largement documentée, facilement accessible, fondée sur des données scientifiques et économique (Zhang et al., 2025).

Un cycle efficace des nutriments des coquilles d'œufs vers les cultures a été observé, dans plus de 50 % des exploitations mixtes ; par conséquent, l'interaction entre l'élevage et les cultures constitue un élément essentiel de ce raisonnement. Lorsque les volailles sont élevées sur place, les coquilles d'œufs apparaissent comme un agent de « surcyclage » riche en nutriments, à un taux inférieur à 35 % par rapport aux régimes alimentaires pauvres en protéines qui nécessitent une supplémentation alimentaire pour fournir un apport suffisant en calcium aux poules pondeuses (Bartter et al., 2018b).

Les conditions édaphiques constituent un facteur déterminant de la productivité végétale dans les systèmes agricoles. La structure du sol régit les propriétés physiques essentielles qui influent sur les transferts de matière et d'énergie dans le sol, notamment la diffusion des gaz, l'écoulement des liquides et la rétention d'eau. La taille et la géométrie des pores sont influencées par leur structure. L'apport d'eau et de nutriments aux racines des plantes dépend des caractéristiques des pores. La structure du sol, la distribution granulométrique et la formation d'agrégats et de réseaux de pores sont toutes influencées par les pratiques culturales. Il est donc impératif de préserver la structure du sol afin d'optimiser l'utilisation des nutriments et d'atténuer les conditions favorisant l'accumulation d'insectes (Puerta et al., 2018).

Les coquilles d'œufs présentent de nombreuses propriétés susceptibles d'influencer favorablement la structure et les caractéristiques physiques du sol, créant ainsi des conditions propices à la croissance des plantes et défavorables au développement des insectes. Comparées aux matières organiques fraîches, les coquilles d'œufs se caractérisent par une surface spécifique et une porosité importante, ainsi que par une faible teneur en humidité comprise entre 0,5 % et 3 %. Selon la méthode de collecte, le diamètre des particules peut varier de 0,020 mm à 6 mm. La couleur des particules pulvérisées et non broyées peut aller du blanc au brunâtre. Le rapport surface/volume des particules plus petites est supérieur à celui des particules plus grosses. Les coquilles d'œufs, qu'elles soient pulvérisées ou non broyées, peuvent donc contribuer à l'amélioration de la structure du sol par divers mécanismes. De plus, les amendements à base de coquilles d'œufs ont la capacité d'améliorer l'infiltration de l'eau, de favoriser le drainage, de stimuler l'agrégation du sol et d'améliorer la porosité remplie d'air (Benavides-Reyes et al., 2021).

I.I.5. Utilisations des coquilles d'œufs dans la fertilisation biologique

Outre leur rôle général dans la fertilité des sols, les coquilles d'œufs ont une incidence sur le pH du sol, l'apport en nutriments secondaires et les communautés microbiennes. Elles constituent une alternative pratique aux amendements solubles, car elles conservent leur pouvoir chaulant pendant plus d'une décennie après leur calcification (Thongpalad et al., 2022). La combinaison des amendements, des besoins essentiels des cultures et des doses d'application adaptées aux caractéristiques hydrauliques et tampons du sol permet des apports ciblés dans les systèmes biologiques existants (Bartter et al., 2018b). La gestion du pH du sol est essentielle dans la production biologique de diverses cultures, car le calcium est abondant au niveau de la zone de contact avec le sol. Après calcification, les coquilles d'œufs conservent un pH alcalin, ce qui offre une opportunité considérable d'ajustement du pH lorsque les composants organiques augmentent l'acidité. Le délai d'une semaine entre la fertilisation et l'apport d'œufs ne limite pas l'accès, et des doses d'apport comprises entre 333 et 666 kg ha⁻¹ semblent efficaces. Les effets relatifs sont inégaux, les récoltes de céréales enrichies en calcium laitier étant contrebalancées par l'alimentation pendant les périodes précédant les semis. Il convient d'étudier plus avant les avantages potentiels de l'ajustement du pH, en particulier en association avec d'autres modifications déjà établies et en recourant à des seuils économiques (Tombarkiewicz et al., 2022).

I.II. La spiruline : composition bioactive, propriétés biologiques et applications agricoles durables

La spiruline, une microalgue cyanobactérienne de couleur bleu-vert relevant du phylum des cyanobactéries, s'est imposée comme un ingrédient essentiel dans les domaines de l'alimentation diététique et de l'alimentation animale en raison de sa valeur nutritionnelle et de sa composition. La spiruline est également proposée à la vente à l'échelle mondiale en tant qu'ingrédient dans les nutraceutiques, les compléments alimentaires et les aliments fonctionnels. Considéré comme l'un des compléments alimentaires les plus complets et nutritifs, il est riche en nutriments essentiels, comprenant plus de 60 % de protéines, des acides gras essentiels, des vitamines, des minéraux, des antioxydants ainsi que des composés phytochimiques susceptibles de contribuer à la santé. Les recherches qui synthétisent de manière critique les connaissances actuelles concernant l'extrait de spiruline demeurent peu fréquentes, en dépit de son importance (Maleš et al., 2019; Prete et al., 2024).

I.II.1. Taxonomie et composition

Parmi les microalgues les plus cultivées, la spiruline (*Arthrospira*) est constituée de cyanobactéries filamenteuses et glissantes que l'on trouve dans les lacs aux eaux douces et alcalines. Les algues bleu-vert sont celles qui contiennent des pigments bleus (phyco/c-phycocyanine) et verts (chlorophylle). Les espèces de spiruline en font partie. *Arthrospira* est un genre de micro-organismes qui comprend à la fois des espèces aquatiques et terrestres. Depuis 2002, la spiruline est consommée comme aliment et classée comme inoffensive par l'Autorité européenne de sécurité des aliments. Elle regorge de propriétés fonctionnelles, de composés bioactifs et de divers macronutriments (Maleš et al., 2019).



Figure .I.2: Composition bioactives de la spiruline (Bortolini et al., 2022)

I.II.1. Composition en macronutriments

La spiruline constitue un complément précieux aux régimes végétariens et végétaliens en raison de sa forte teneur en acides aminés essentiels, qui contribuent à sa teneur en protéines de 50 à 70 % (sur la base de la matière sèche) et à son profil en acides aminés complet et équilibré. Dans certaines cultures, les sources de protéines sont considérées comme suffisantes sur le plan nutritionnel pour les personnes de tous âges et fournissent moins de 50 % de l'ensemble des acides aminés. La biomasse algale est composée de triglycérides (TGA) et de phospholipides, les lipides représentant 2 à 11 % du total. L'acide gras non polaire C18:3, l'acide gras polyinsaturé polaire β -linoléique, l'acide linoléique, l'acide arachidonique, l'acide docosahexaénoïque et l'acide eicosapentaénoïque (types 20:4, 22:6 et 20:5) seraient présents en quantités minimes. Les acides gras libres et les phospholipides constituent la majeure partie de la fraction lipidique. La teneur en glucides, principalement des

polysaccharides, varie de 8,5 à 27 %. Par rapport à d'autres espèces d'algues, la teneur totale en amidon est modeste, allant de 12,4 % à 14 %. Le glycogène est présent à un taux de 0,13 à 4,5 % (Mohammadi et al., 2022; Tavakoli et al., 2025).

I.II.2. Composés bioactifs

Le phytoplancton produit des composés bioactifs dotés d'un large éventail de propriétés biologiques, telles que des propriétés antioxydantes, anticancéreuses, antimicrobiennes et anti-inflammatoires. Ces composés sont principalement constitués de protéines, de lipides, de glucides, de micronutriments et de métabolites secondaires. Les composés bioactifs présentent des propriétés antioxydantes, anticancéreuses, antivirales, immunomodulatrices et anti-inflammatoires (Abreu et al., 2023).

La spiruline (*Arthrospira platensis*) est riche en composés bioactifs pouvant présenter un intérêt pour les secteurs pharmaceutique, cosmétique, de l'alimentation animale et de l'alimentation humaine. Les caroténoïdes, les polysaccharides, les acides gras polyinsaturés et saturés, les protéines, les vitamines, les composés phénoliques, les flavonoïdes, la phycocyanine, les sulfolipides de cyanovirine-N et la spirulane de calcium sont autant d'exemples de composés bioactifs. Ces composés issus de la spiruline ont été identifiés comme présentant un potentiel pour le développement de nouveaux médicaments destinés aux humains et aux animaux, notamment pour le traitement de maladies telles que les tumeurs malignes, les maladies cardiaques et les infections virales (Fais et al., 2022).

I.II.3. Effets biologiques et mécanismes

Comme le démontrent des données in vitro et in vivo, la spiruline produit divers effets biologiques. Ses propriétés antioxydantes, immunomodulatrices, régulatrices du métabolisme et des lipides, ainsi qu'anti-inflammatoires, comptent parmi les mécanismes spécifiques qui sous-tendent ses actions d'intérêt (Fais et al., 2022). Les principales cibles et voies de signalisation associées à ces effets sont influencées par les constituants bioactifs de la spiruline, notamment la phycocyanine, les composés phénoliques, les caroténoïdes et l'acide gamma-linolénique (GLA).

De multiples mécanismes sont responsables de l'activité antioxydante. En plus de réduire le malondialdéhyde et d'améliorer les marqueurs du stress oxydatif, la spiruline protège les cellules contre la peroxydation lipidique et inactive les radicaux superoxydes libres. La phycocyanine et la phycocyanobiline participent à la prévention de la néphropathie diabétique en inhibant le stress oxydatif. Le profil protecteur est encore renforcé par l'activation de la catalase et l'inhibition de la peroxydase par la phycocyanine dans des modèles d'hépatotoxicité. L'activité des cellules tueuses naturelles est renforcée par les effets protecteurs et l'inhibition du stress oxydatif, qui favorisent l'immunité innée (Maleš et al., 2019).

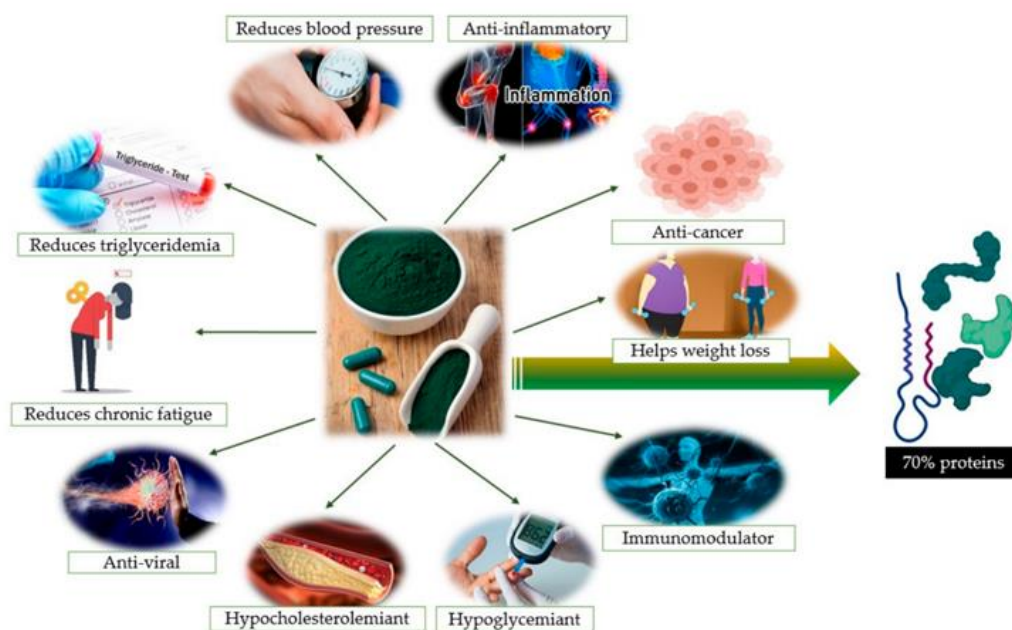


Figure .I.3: Bienfaits pour la santé d'une supplémentation en spiruline (Bobescu et al., 2020)

I.II.3.1. Activité antioxydante

Les tests de piégeage des radicaux 2,2-diphényl-1-picrylhydrazyle (DPPH) et 2,2'-azinobis (3-éthylbenzothiazoline-6-acide sulfonique) (ABTS) ont été utilisés pour évaluer l'activité antioxydante totale de l'extrait aqueux de *Spirulina platensis* (ESP). Dans les tests DPPH et ABTS, l'extrait a démontré une activité antioxydante d'environ 50 % par rapport aux vitamines C et E. L'activité antioxydante de l'ESP était nettement supérieure à celle de la phycocyanine, le pigment prédominant de la spiruline. Dans le test ABTS, il a présenté une activité antioxydante d'environ 50 % par rapport aux vitamines C et E à une concentration de 25 µg/mL. Cette activité a augmenté et est devenue comparable à celle des vitamines à une concentration de 50 µg/mL (Chu et al., 2010).

I.II.3.2. Effets immunomodulateurs

Selon des études épidémiologiques, les propriétés immunomodulatrices de la spiruline sont à l'origine de ses effets bénéfiques (Huang et al., 2018). Les extraits de spiruline activent les monocytes, stimulent la sécrétion de cytokines et renforcent l'activité des cellules tueuses naturelles au niveau cellulaire en les activant par l'intermédiaire du récepteur Toll-like 2. Il a été démontré que la spiruline renforce les réponses immunitaires adaptatives et régule l'inflammation allergique ainsi que la production de cytokines chez les patients atteints de rhinite allergique au niveau de l'organisme. Des recherches supplémentaires indiquent que cette microalgue a le potentiel de modifier la composition du microbiote intestinal et d'influencer les niveaux de biomarqueurs dans les selles, ce qui pourrait offrir une protection contre l'inflammation hépatique et contribuer au maintien de la santé intestinale.

I.II.3.3. Effets sur le métabolisme et la régulation lipidique

Le diabète et les maladies cardiovasculaires comptent parmi les nombreuses pathologies et états de santé étroitement liés à des anomalies métaboliques. La spiruline est susceptible de moduler les troubles métaboliques par le biais de divers mécanismes (Huang et al., 2018). Selon certaines études, la spiruline a démontré des effets régulateurs sur les troubles métaboliques liés à l'obésité et sur le poids corporel induits par un régime riche en graisses. Dans un modèle de rat obèse, elle a réduit la prise alimentaire, le glucagon, le cholestérol total et le cholestérol des lipoprotéines de basse densité, tout en augmentant simultanément les concentrations de triglycérides, de glucose, d'adiponectine et de cholestérol des lipoprotéines de haute densité (Hua et al., 2018). Les symptômes de la dyslipidémie induite par un régime riche en graisses peuvent être atténués par l'administration de *Spirulina platensis* (Li et al., 2018).

I.II.3.4. Propriétés anti-inflammatoires

La *Spirulina platensis* présente des propriétés anti-inflammatoires par le biais de divers mécanismes. L'œdème de la patte induit par le carraghénane chez le rat a été considérablement atténué par l'administration orale de fractions de polysaccharides extraites de cette microalgue. Le composant actif de l'extrait aqueux a été identifié comme étant un polysaccharide hydrosoluble de faible poids moléculaire, grâce à un fractionnement guidé par des tests biologiques d'un extrait aqueux. Une activité anti-inflammatoire a également été démontrée par d'autres fractions de polysaccharides de haut poids moléculaire. Un extrait d'acétate d'éthyle exempt de polysaccharides n'a présenté aucune activité inhibitrice, ce qui

suggère que les effets anti-inflammatoires ne sont pas attribués à la phycobiliprotéine ou aux composés phénoliques. Dans les cellules de macrophages RAW264.7 stimulées par le LPS, les fractions de polysaccharides ont inhibé l'expression de l'ARNm des cytokines pro-inflammatoires, notamment l'IL-1 β et le TNF- α , ainsi que la production de NO in vitro. La biomasse cellulaire et un milieu de culture sans cellules riche en polysaccharides ont également présenté des effets anti-inflammatoires (Baghdadabad et al., 2023).

La C-phycocyanine, l'allophycocyanine et les polysaccharides sont les composés actifs responsables des effets anti-inflammatoires de *Spirulina platensis*. La C-phycocyanine est reconnue pour sa capacité à réduire la production de médiateurs pro-inflammatoires et d'espèces réactives de l'oxygène dans les macrophages et les microglies stimulés par les lipopolysaccharides (LPS).

Maleš et al. (2019) ont démontré que la spiruline inhibe le facteur nucléaire κ B (NF- κ B) et active la voie de signalisation du récepteur gamma activé par les proliférateurs de peroxysomes (PPAR- γ), ce qui entraîne une réduction de l'activité des histone désacétylases et une diminution de l'expression des cytokines pro-inflammatoires, notamment l'IL-1 β , l'IL-6 et le TNF- α .

I.II.4. Rôles écologiques de la spiruline dans les systèmes aquatiques et terrestres

Spirulina is a filamentous cyanobacterium that thrives in saline and alkaline environments. It is an edible microorganism that is a component of microbial communities in both terrestrial and aquatic environments. *Spirulina* can be found in lakes and wetlands (Mogale, 2016). It is involved in bacterial-algal interactions that affect the production of nutraceutical compounds, biomass, and growth rate. It is a crucial organism of choice in aquaculture due to its interactions and characteristics. It also engages with a diverse array of environmentally associated microbes in the rhizosphere of a variety of plants and land-based substrates. These interactions have the potential to enhance crop productivity by balancing or stabilizing the pathogen burden from external sources. These interactions occur in the presence or absence of collaborators who have the ability to degrade environmental pollutants or biogeochemical components.

Adaptation processes are demonstrated by spirulina in order to endure extreme environments. It has the ability to endure these conditions by modifying its morphology and cell physiology, and it has been shown to be capable of utilizing a variety of organic and inorganic sources. The organism's capacity to endure environmental stresses renders it appropriate for a variety of agricultural applications, including cover crops and main crops. It has been investigated for its potential as an amendment in soil systems that have been impacted by salinity or commercial amendments (Yadav et al., 2022).



Figure .I.4: Perspectives d'une économie circulaire de la spiruline pour la gestion environnementale et des énergies renouvelables (Musa et al., 2025)

I.II.4.1. Production phototrophique et fixation du carbone

Le cycle de Calvin est un mécanisme essentiel par lequel les écosystèmes photosynthétiques contribuent à la fixation du CO₂ sur Terre. Chez les organismes phototrophes, les membranes thylakoïdes contiennent des pigments absorbant la lumière (par exemple, la chlorophylle a, la phycoérythrine, phycocyanine) et des enzymes fixatrices de carbone (par exemple, la ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygénase, la phosphoribulokinase) qui facilitent la production de biomasse par assimilation pendant la journée (Bittencourt Sydney, 2010). Par rapport à d'autres espèces photoautotrophes, la spiruline présente une efficacité modérée de fixation du CO₂ (Kumar et al., 2013). Dans les photobioréacteurs, *Spirulina platensis* atteint des taux de croissance spécifiques de 0,075 à 0,14 g m⁻² j⁻¹ et des taux de production de biomasse de 1,17 à 2,47 g m⁻² j⁻¹ dans des

conditions optimales. D'après des analyses approfondies, la fixation du CO₂ varie entre 0,14 et 0,48 g L⁻¹ j⁻¹ en fonction de l'apport en nutriments. Les combinaisons nutritionnelles les plus efficaces consistent en un mélange de nutriments tropicaux et d'eau douce, le nitrate servant de source d'azote (Iamtham & Sornchai, 2022).

I.II.4.2. Interactions avec les communautés microbiennes

La composition complexe et la diversité des activités biologiques des communautés microbiennes complexes sont fortement influencées par la spiruline. La productivité globale de la spiruline dépend en grande partie de la présence et des interactions d'une multitude de micro-organismes et de bactéries qui coexistent librement dans son environnement. À l'heure actuelle, elle est probablement reconnue comme la microalgue la plus largement produite à l'échelle mondiale. Il est généralement admis que le réseau complexe de micro-organismes qui lui est associé a un impact substantiel et bénéfique sur sa production. Ces micro-organismes facilitent non seulement la croissance de la spiruline, mais contribuent également à son impact écologique et à sa qualité nutritionnelle (Mogale, 2016).

I.II.4.3. Adaptations environnementales et résilience

Diverses communautés microbiennes indigènes coexistent avec la spiruline cultivée. Il est essentiel de comprendre les mécanismes naturels qui régulent leur croissance, notamment la pression sélective exercée par ces communautés, afin d'assurer la propagation réussie de la spiruline. Dans des conditions non contrôlées, diverses espèces de ces bactéries associées peuvent rapidement infecter les cultures de spiruline à des températures comprises entre 25 et 30 °C. L'importance des mesures préventives visant à exclure ou à contrôler ces contaminants est soulignée par leur réduction substantielle de la biomasse totale de la spiruline. En général, la capacité à produire des protéines ou des polysaccharides est compromise par le stress (Perera et al., 2022).

En raison de sa nature procaryote, la spiruline est considérée comme un candidat potentiel pour la bioremédiation durable dans les sols fortement contaminés, surpassant la capacité de survie de nombreuses autres algues. La spiruline est capable d'utiliser l'hydrogène comme donneur d'électrons alternatif par fermentation photolytique anaérobie sur des substrats mixtes et peut tolérer des concentrations en sel allant jusqu'à 5 %. Les cyanobactéries sont capables d'accumuler de la L-proline, du glycérol, du saccharose, du tréhalose et du glucosylglycérol en tant que substances d'ajustement osmotique, et elles maintiennent des pressions osmotiques extrêmement élevées à l'intérieur de leurs cellules.

De plus, la spiruline détecte le stress, l'intensité lumineuse et les carences en nutriments. On observe de multiples adaptations spécifiques de la communauté bactérienne associée à la spiruline à l'autre microalgue du consortium, en réponse à la fois à l'intensité lumineuse et au stade de croissance (Mogale, 2016).

I.II.5. Applications agricoles de la spiruline

Spirulina is employed as a nutrient-rich supplement in animal nutrition, among other agricultural applications. Its potential to enhance the health and growth of livestock has been investigated in terms of its protein and energy content. The production of spirulina biomass is influenced by environmental factors, including temperature, salinity, and light, which can be optimized to achieve the highest possible yield. It also contributes to biofertilization, which improves crop productivity and soil fertility. The utilization of bioactive compounds, such as phycobiliproteins, in agricultural biotechnologies is facilitated by methods for rapid extraction (Mogale, 2016).

I.II.5.1. Amendement du sol et fertilisation

L'amélioration durable des rendements et la promotion de la santé des sols constituent les avantages de l'utilisation d'engrais verts en agriculture. L'efficacité agronomique de la biomasse cyanobactérienne fait actuellement l'objet d'évaluations. La spiruline est un candidat prometteur pour le traitement de multiples affections. Sa biomasse constitue une source importante d'amendement et d'engrais à long terme pour les sols grâce à sa composition équilibrée en macronutriments (azote, phosphore et potassium) (Alobwede et al., 2019).

La spiruline est capable de réguler efficacement la teneur en humidité du sol dans les environnements semi-arides caractérisés par une faible teneur en matière organique, une évaporation excessive et des pertes de nutriments. Son exploration en tant qu'engrais organique est encore encouragée par l'impact bénéfique des biostimulants à base de spiruline sur la croissance du maïs et son potentiel commercial.

En utilisant la biomasse de spiruline comme engrais organique, il est possible d'améliorer la qualité d'une variété de sols sous-développés tout en préservant simultanément ses propriétés et sa valeur uniques (Oyebiyi et al., 2026).

I.II.5.2. Stimulation de la croissance des cultures

Kumar et al. (2013) (Kumar et al., 2013) ont attribué les effets bénéfiques de la spiruline sur la croissance des plantes à divers mécanismes, notamment à la présence de composés bioactifs. L'utilisation d'extrait ou de poudre de spiruline sur les sols et les cultures a entraîné une augmentation de 13 % de la production de tubercules de pomme de terre et de 14 % de la production de tomates (Rojas et al., 2017). La prise de poids et le rendement total en carcasse des chèvres nourries avec des régimes alimentaires contenant 20 % de spiruline ont été améliorés par l'application de poudre de spiruline à raison de 600 kg ha⁻¹, comme l'ont démontré des essais en plein champ.

Les effets bénéfiques observés sur diverses espèces végétales dépendent de la concentration de l'extrait ou de la poudre appliquée. La hauteur et le nombre de feuilles vertes ont augmenté de manière linéaire sur les plants de maïs sucré lorsque les mêmes concentrations (0,5 g L⁻¹, 1,0 g L⁻¹ et 1,5 g L⁻¹) d'extrait de spiruline ont été appliquées par pulvérisation foliaire. Cela n'a entraîné aucun effet indésirable sur les caractéristiques physiques des grains, le délai de récolte ou la période de floraison. L'application de poudre de spiruline a été évaluée sur deux cultivars distincts de chou à des concentrations de 0,25 g L⁻¹, 0,5 g L⁻¹ et 0,75 g L⁻¹. Il a été constaté que des additifs de poudre de spiruline allant jusqu'à un maximum de 0,333 g L⁻¹ avaient un impact positif sur les deux cultivars, avec une tendance générale à l'augmentation du rendement du concombre (*Cucumis sativus*) (Al-Ramamneh, 2024).

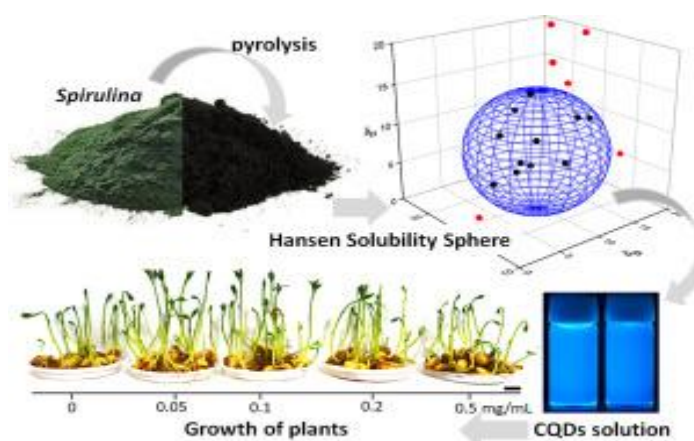


Figure .I.5: Utilisation de la spiruline pour la croissance végétale (Agnol et al., 2021)

Chapitre II: Matériels et Méthodes

II.1. Objectifs de l'étude

Notre étude a été réalisée dans les laboratoires pédagogiques de l'université d'El Oued, au sein de la faculté des sciences de la nature et de la vie. Cette étude s'inscrit dans le contexte de la valorisation des déchets organiques et des biomasses naturelles en vue de préserver l'écosystème et d'améliorer les pratiques agricoles durables. L'objectif principal de ce travail est d'évaluer l'effet de mélanges à base de poudre de coquille d'œuf, de spiruline et d'acide tannique sur le pouvoir germinatif du blé dur (*Triticum durum*).

Les objectifs spécifiques de cette expérimentation sont les suivants :

- Mettre en valeur les déchets de coquilles d'œuf en tant que source naturelle de calcium et d'éléments minéraux ;
- Analyser l'impact de la spiruline, considérée comme une biomasse riche en protéines, vitamines et composés bioactifs, sur la germination du blé dur ;
- Examiner l'effet de l'acide tannique sur la croissance précoce des plantules ;
- Comparer les divers mélanges dans le but de déterminer la formulation la plus efficace pour optimiser le taux de germination et favoriser la croissance des plantules ;
- Participer au développement de solutions écologiques et durables en matière de fertilisation et de stimulation de la croissance végétale ;
- Diminuer l'impact environnemental des déchets organiques par leur réutilisation dans le secteur agricole ;

Cette approche expérimentale vise également à promouvoir l'économie circulaire à travers la transformation de déchets biodégradables en produits à valeur ajoutée utilisables dans l'agriculture durable.

II.2. Présentation générale de l'étude

La germination représente une phase cruciale dans le processus de développement des plantes, car elle conditionne la capacité des graines à engendrer des plantules à la fois viables et robustes. Divers facteurs peuvent exercer une influence sur ce processus, parmi lesquels figurent la disponibilité en eau, la température, la composition minérale de l'environnement, ainsi que la présence de substances susceptibles d'agir comme stimulants ou inhibiteurs.

Dans le cadre actuel de la protection de l'environnement et de la recherche de solutions alternatives aux engrais chimiques, la valorisation des déchets organiques constitue une stratégie significative pour atténuer la pollution et renforcer la fertilité des sols. Les coquilles

d'œuf représentent un déchet domestique considérable, riche en carbonate de calcium et en oligoéléments susceptibles de favoriser le développement des plantes.

La spiruline (*Spirulina platensis*) est une microalgue réputée pour sa valeur nutritionnelle remarquable. Elle renferme des protéines, des vitamines, des pigments naturels, des acides aminés ainsi qu'une multitude de composés biologiquement actifs susceptibles de favoriser la croissance des plantes.

L'acide tannique constitue un composé phénolique d'origine naturelle, reconnu pour ses propriétés antioxydantes et antimicrobiennes. À des concentrations faibles, il peut jouer un rôle dans la régulation de divers processus physiologiques au sein des plantes.

Dans le cadre de cette étude, diverses formulations intégrant ces trois composants ont été élaborées dans le but d'évaluer leur impact sur la germination du blé dur ainsi que sur les premiers stades de développement des plantules.

II.3. Matériel végétal

Les graines de blé dur *Triticum durum* (Vitron ORD) utilisées dans cette étude ont été obtenues auprès de coopérative des céréales et des légumes secs Teksebt El Oued Les graines sélectionnées étaient homogènes en taille et exemptes de dommages mécaniques ou d'infections visibles afin de garantir une germination uniforme (**Figure II.1**).



Figure II.1 : La variété de blé dur utilisé dans l'expérimentation *Triticum durum*
(Originale, 2026)

II.4. Préparation des poudres et des solutions

II.4.1. Poudre de coquille d'œuf

Les coquilles d'œuf ont été récupérées à partir de déchets domestiques, puis soigneusement lavées à l'eau distillée afin d'éliminer les impuretés et les résidus organiques. Après lavage, elles ont été séchées à température ambiante puis broyées à l'aide d'un broyeur électrique jusqu'à l'obtention d'une poudre fine. La poudre obtenue a été conservée dans des flacons hermétiques à l'abri de l'humidité (Figure II.2).



Figure II.2 : La poudre de coquille utilisés dans l'expérimentation (Originale, 2026)

II.4.2. Poudre de la spiruline

La poudre de spiruline *Spirulina platensis* utilisée dans cette étude a été obtenue sous forme commerciale. Elle a été conservée dans des conditions sèches et à température ambiante jusqu'à son utilisation (Figure II.3).



Figure II.3 : La poudre de spiruline utilisée dans l'expérimentation (Originale, 2026)

II.4.3. Acide tannique

L'acide tannique utilisé dans cette expérimentation était de qualité analytique. Les différentes concentrations ont été préparées par dissolution dans de l'eau distillée avant application.

II.5. Préparation des mélanges

Les 17 traitements expérimentaux ont été préparés à partir de différentes proportions de poudre de coquille d'œuf, de poudre de spiruline et d'acide tannique et chaque traitement à 6 répétitions. Les quantités utilisées variaient selon les traitements afin d'évaluer leur effet sur le pouvoir germinatif du blé dur. Après la préparation des différents mélanges, les solutions ont été soumises à une agitation continue pendant 30 minutes à l'aide d'un agitateur magnétique afin d'assurer une bonne homogénéisation des composants et de favoriser l'extraction des molécules bioactives présentes dans les différents constituants du mélange (Figure II.4 ; Tableau II.1).



Figure II.4 : Préparation de mélange utilisé pour le test de la germination (Originale, 2026)

Tableau II.1: Les principales concentrations testées dans l'expérimentation

Traitement	Poudre de spiruline (g)	Poudre de coquille d'œuf (g)	Acide tannique (g)
T1	0,2	0,8	0,015
T2	0,6	0,4	0,015
T3	0,6	0,8	0,010
T4	0,6	0,8	0,010
T5	1,0	0,4	0,010
T6	0,2	0,8	0,005
T7	0,2	1,2	0,010
T8	0,6	0,4	0,005
T9	0,6	0,8	0,010
T10	0,6	0,8	0,010
T11	0,2	0,4	0,010
T12	0,6	0,8	0,010
T13	0,6	1,2	0,005
T14	0,6	1,2	0,015
T15	1,0	1,2	0,010
T16	1,0	0,8	0,015
T17	1,0	0,8	0,005

II.6. Test de germination

Le test de germination a été réalisé selon le protocole décrit par (Ashagre et al., 2014). Il a été effectué dans des boîtes de Pétri revêtues de papier filtre stérile, préalablement humidifié avec de l'eau distillée. Préalablement à l'expérimentation, les graines de blé dur *Triticum durum* ont été rigoureusement sélectionnées afin de ne conserver que celles qui sont saines, homogènes et dépourvues de toute altération ou contamination manifeste.

Les graines ont par la suite été désinfectées par immersion dans une solution d'eau de Javel à 5 % pendant une durée de 5 minutes, dans le but d'éliminer les éventuels microorganismes susceptibles d'être présents à leur surface.

Suite à la désinfection, les graines ont été soigneusement rincées à trois reprises avec de l'eau distillée stérile dans le but d'éliminer les résidus de Javel.

Par la suite, un total de quinze (15) graines de blé dur a été soigneusement placées dans chaque boîte de Pétri pour l'ensemble des traitements expérimentaux.

Les graines ont été traitées avec les différents mélanges préparés à base de poudre de coquille d'œuf, de spiruline et d'acide tannique. Les boîtes ont ensuite été incubées à température ambiante dans des conditions contrôlées.

Le suivi de la germination a été effectué quotidiennement pendant une période de 10 jours. Le nombre de graines germées a été enregistré chaque jour afin de déterminer le pourcentage de germination.

Une graine a été considérée comme germée lorsque la radicule atteignait une longueur visible supérieure à 2 mm.



Figure II.5 : Protocole d'application de traitement (Originale, 2026)

II.7. Mesure des paramètres de croissance

Après germination, plusieurs paramètres ont été évalués afin de déterminer l'effet des traitements sur la croissance des plantules :

- * Le pourcentage de germination ;
- * La longueur des racines (cm) ;
- * La longueur des tiges (cm).

Les longueurs des racines et des tiges ont été mesurées à l'aide d'une règle graduée.

II.8. Analyse statistique

Le protocole expérimental suivait un plan d'expérience entièrement aléatoire (CRD) avec neuf répétitions pour chaque échantillon ($n = 9$). L'analyse des données a été réalisée à l'aide d'une analyse de variance à deux facteurs (ANOVA), à l'aide du logiciel SAS version 9.2 (SAS Institute, Cary, Caroline du Nord, États-Unis) afin d'évaluer la pertinence des résultats.

Chapitre III: Résultats et Discussion

III.1. Résultats

III.1.1. Effet des différents traitements sur la croissance des plantules de blé dur

Les résultats obtenus concernant l'effet des différents mélanges à base de spiruline, de poudre de coquille d'œuf et d'acide tannique sur la croissance des plantules de blé dur (*Triticum durum*) sont présentés dans le **Tableau III.1**. L'analyse des observations quotidiennes a montré une variation importante des réponses physiologiques des graines selon les traitements appliqués. D'une manière générale, aucune croissance visible n'a été observée durant les premiers jours de l'expérimentation (J1 à J5) pour la majorité des traitements. Cette phase de latence correspond probablement à la période d'imbibition des graines et à l'activation progressive des mécanismes métaboliques impliqués dans la germination. Les premières manifestations de croissance ont commencé à apparaître à partir du sixième jour pour plusieurs traitements. Les valeurs enregistrées variaient entre 0,3 cm et 1 cm selon les formulations testées et la durée d'incubation. Comme indiqué dans le **Tableau III.1**, les traitements ont montré des comportements très différents vis-à-vis du développement des plantules. Certains mélanges ont stimulé significativement la croissance, tandis que d'autres n'ont provoqué aucune réponse visible pendant toute la durée du suivi expérimental.

Le traitement T7, composé de 0,2 g de spiruline, 1,2 g de poudre de coquille d'œuf et 0,01 g d'acide tannique, a présenté les meilleurs résultats. Les premières croissances ont été observées dès le sixième jour avec des valeurs comprises entre 0,5 et 0,7 cm. Cette croissance s'est progressivement intensifiée au cours des jours suivants pour atteindre environ 1 cm au dixième jour. Ce traitement semble donc avoir créé des conditions favorables au développement précoce des plantules. Le traitement T11 (0,2 g de spiruline ; 0,4 g de poudre de coquille d'œuf ; 0,01 g d'acide tannique) a également montré une activité stimulatrice importante. Les longueurs observées ont progressivement augmenté entre le sixième et le dixième jour, atteignant des valeurs maximales proches de 0,9 cm. Une évolution régulière de la croissance a été observée durant toute la période d'incubation. Par ailleurs, le traitement T13, contenant 0,6 g de spiruline, 1,2 g de poudre de coquille d'œuf et 0,005 g d'acide tannique, a montré une croissance relativement élevée avec des valeurs atteignant 0,8 cm au dixième jour. Ces résultats indiquent qu'une faible concentration d'acide tannique associée à une quantité élevée de poudre de coquille d'œuf peut favoriser le développement des plantules.

D'autres traitements tels que T3, T4, T10 et T14 ont présenté une croissance modérée avec des valeurs variant généralement entre 0,5 et 0,7 cm durant les derniers jours de l'expérimentation. En revanche, plusieurs traitements, notamment T1, T12, T15, T16 et T17, n'ont montré aucune croissance visible pendant toute la durée de l'étude. L'absence de développement observée dans ces traitements pourrait être liée à un déséquilibre des concentrations utilisées ou à un effet inhibiteur exercé par certains composants du mélange. Globalement, les résultats présentés dans le **Tableau III.1** montrent que les formulations contenant des concentrations modérées de spiruline, des quantités relativement élevées de poudre de coquille d'œuf et de faibles concentrations d'acide tannique ont donné les meilleures réponses en termes de croissance des plantules. Ces observations suggèrent l'existence d'une interaction importante entre les différents composants des mélanges, influençant directement la capacité germinative et le développement initial du blé dur.

Tableau III.1 : Évolution de la croissance des plantules de blé dur (*Triticum durum*) traitées par différents mélanges de spiruline, poudre de coquille d'œuf et acide tannique pendant 10 jours d'incubation

Run	Spiruline (g)	ESP (g)	TA (g)	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10
1;1	0,2	0,8	0,015	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-
1;2				0	0	0	-	-	-	-	-	-	-
1;3				0	0	0	-	-	-	-	-	-	-
1;4				0	0	0	-	-	-	-	-	-	-
1;5				0	0	0	-	-	-	-	-	-	-
2;1	0,6	0,4	0,015	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2;2				0	-	-	-	-	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
2;3				0	-	-	-	-	0,3	0,3	0,5	0,5	0,5
2;4				0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2;5				0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3;1	0,6	0,8	0,010	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-
3;2				0	0	0	-	-	-	-	-	-	-
3;3				0	0	0	-	-	-	-	0,7	0,7	0,7
3;4				0	0	0	-	-	-	-	-	-	-
3;5				0	0	0	-	-	-	-	-	-	-

4;1	0,6	0,8	0,010	0	0	0	-	-	-	-	0,5	0,5	0,5
4;2				0	0	0	-	-	-	-	-	-	-
4;3				0	0	0	-	-	-	-	0,5	0,5/0,5	0,5/0,7
4;4				0	0	0	-	-	-	-	-	-	-
4;5				0	0	0	-	-	-	-	-	-	-
5;1	1,0	0,4	0,010	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5;2				0	-	-	-	-	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
5;3				0	-	-	-	-	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
5;4				0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5;5				0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6;1	0,2	0,8	0,005	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6;2				0	-	-	-	-	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5/0,7
6;3				0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6;4				0	-	-	-	-	0,3	0,3	0,5	0,5	0,5
6;5				0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7;1	0,2	1,2	0,010	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7;2				0	-	-	-	-	0,5	0,5/0,7	0,5/0,8	0,7/0,8	1/0,7
7;3				0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7;4				0	-	-	-	-	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
7;5				0	-	-	-	-	1/0,7	0,5/1/0,7	0,5/1/0,7	0,7/1	1/0,7
8;1	0,6	0,4	0,005	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8;2				0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8;3				0	-	-	-	-	0,3	0,3/0,5	0,5	0,5	0,5
8;4				0	-	-	-	-	0,3	0,3/0,5	0,5	0,5	0,5
8;5				0	-	-	-	-	-	-	-	-	-

ESP : poudre de coquille d'œuf ; TA : acide tannique./(-):La Longueur est inférieure à 0.3 cm

III.1.2. Analyse statistique du pourcentage de germination

III.1.2.1. Analyse descriptive et comparaison des valeurs expérimentales et prédites

Afin d'évaluer l'effet des différents mélanges à base de spiruline, de poudre de coquille d'œuf et d'acide tannique sur le pourcentage de germination du blé dur (*Triticum durum*), les données expérimentales ont été soumises à une analyse statistique basée sur la méthodologie des surfaces de réponse (RSM). Cette approche a permis d'étudier simultanément les effets individuels des facteurs ainsi que leurs interactions. Les valeurs expérimentales du pourcentage de germination ainsi que les valeurs prédites par le modèle statistique sont présentées dans le **Tableau III.2**.

Comme indiqué dans le **Tableau III.2**, le pourcentage de germination varie considérablement selon les traitements appliqués. Les valeurs enregistrées s'étendent de 10,67 % à 82,67 %, traduisant une influence importante des concentrations de spiruline, de poudre de coquille d'œuf et d'acide tannique sur la germination des graines de blé dur. Les traitements T6 et T7 ont présenté les meilleurs taux de germination avec une valeur maximale de 82,67 %. Ces traitements correspondaient à de faibles concentrations de spiruline associées à des concentrations modérées ou élevées de poudre de coquille d'œuf et à une faible teneur en acide tannique. En revanche, le traitement T15 a enregistré le taux de germination le plus faible avec seulement 10,67 %, indiquant un effet inhibiteur probable des concentrations élevées de spiruline combinées aux autres facteurs. Par ailleurs, une forte concordance entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites a été observée dans le **Tableau III.2**, ce qui confirme la bonne précision du modèle développé.

Tableau III.2 : Valeurs expérimentales et valeurs prédites du pourcentage de germination du blé dur obtenues par le modèle RSM

Run	Factor 1 A : Spirulina (g)	Factor 2 B : ESP (g)	Factor 3 C : TA (g)	Germination % R actual	R predicted RSM
1	0,2	0,8	0,015	64	61,04
2	0,6	0,4	0,015	21,67	25,5862
3	0,6	0,8	0,01	48,94	48,94
4	0,6	0,8	0,01	48,94	48,94
5	1	0,4	0,01	26,67	23,7113
6	0,2	0,8	0,005	82,67	83,6275

7	0,2	1,2	0,01	82,67	85,6287
8	0,6	0,4	0,005	38,67	38,6687
9	0,6	0,8	0,01	48,94	48,94
10	0,6	0,8	0,01	48,94	48,94
11	0,2	0,4	0,01	60	59,0437
12	0,6	0,8	0,01	48,94	48,94
13	0,6	1,2	0,005	46,67	42,7538
14	0,6	1,2	0,015	36	36,0013
15	1	1,2	0,01	10,67	11,6262
16	1	0,8	0,015	20	19,0425
17	1	0,8	0,005	13,33	16,29

III.1.2.2. Évaluation de la performance du modèle RSM et des paramètres statistiques d'ajustement

Les différents paramètres statistiques utilisés pour évaluer la qualité et la validité du modèle quadratique sont présentés dans le **Tableau III.3**. Les résultats présentés dans le **Tableau III.3** montrent que le modèle quadratique obtenu possède une excellente qualité d'ajustement. Le coefficient de détermination ($R^2 = 0,9905$) indique que 99,05 % de la variabilité du pourcentage de germination est expliquée par le modèle statistique. Cette valeur élevée confirme la forte capacité prédictive du modèle. Le coefficient de détermination ajusté (R^2 ajusté = 0,9783) reste très proche du coefficient de détermination prédit (R^2 prédit = 0,8479), ce qui démontre une bonne stabilité et une excellente fiabilité du modèle. Le coefficient de variation ($CV = 7,16$ %) demeure relativement faible, traduisant une bonne précision expérimentale et une faible dispersion des données. De plus, le rapport signal/bruit (Adeq Precision = 30,6507) est largement supérieur à la valeur minimale recommandée de 4, indiquant ainsi une qualité satisfaisante du signal expérimental et une bonne aptitude du modèle à explorer le domaine expérimental étudié.

Tableau III.3 : Paramètres statistiques d'évaluation et de validation du modèle quadratique RSM appliqué au pourcentage de germination de *Triticum durum*.

Std. Dev.	3,15	R²	0,9905
Mean	43,98	Adjusted R²	0,9783
C.V. %	7,16	Predicted R²	0,8479
Adeq Precision			30,6507
The Predicted R² of 0,8479 is in reasonable agreement with the Adjusted R² of 0,9783; i.e. the difference is less than 0.2.			
Adeq Precision measures the signal to noise ratio. A ratio greater than 4 is desirable. Your ratio of 30,651 indicates an adequate signal. This model can be used to navigate the design space.			

III.1.2.3. Analyse de la variance (ANOVA) et identification des facteurs significatifs

L'analyse de variance (ANOVA) a été réalisée afin de déterminer l'effet des différents facteurs expérimentaux ainsi que leurs interactions sur le pourcentage de germination du blé dur. Les résultats obtenus sont regroupés dans le **Tableau III.4**. Les résultats de l'ANOVA présentés dans le **Tableau III.4** montrent que le modèle quadratique est hautement significatif avec une valeur de F égale à 81,01 et une probabilité $p < 0,0001$. Les trois facteurs étudiés — spiruline (A), poudre de coquille d'œuf (B) et acide tannique (C) — ont présenté des effets significatifs sur le pourcentage de germination. Le facteur spiruline a montré l'effet le plus important avec une valeur de F très élevée (603,15 ; $p < 0,0001$), indiquant que ce facteur constitue le principal paramètre influençant la germination des graines de blé dur. La poudre de coquille d'œuf a également exercé un effet significatif ($p = 0,0139$), probablement grâce à sa richesse en calcium et en éléments minéraux essentiels au développement des plantules. L'acide tannique a également montré un effet significatif ($p = 0,0030$), ce qui suggère que ce composé phénolique influence les mécanismes physiologiques impliqués dans la germination. Concernant les interactions entre les facteurs, les interactions AB (spiruline $\times$ poudre de coquille d'œuf) et AC (spiruline $\times$ acide tannique) se sont révélées significatives avec des valeurs de p inférieures à 0,05. Ces résultats indiquent que l'effet de la spiruline dépend fortement des concentrations des autres composants du mélange. En revanche, l'interaction BC (poudre de coquille d'œuf $\times$ acide tannique) n'a montré aucun effet significatif ($p = 0,3482$). Les effets quadratiques B² et C² étaient également significatifs, indiquant l'existence probable de concentrations optimales de poudre de coquille d'œuf et d'acide tannique pour maximiser le pouvoir germinatif du blé dur.

Tableau III.4 : Analyse de variance (ANOVA) du modèle quadratique appliqué au pourcentage de germination du blé dur

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	7225,42	9	802,82	81,01	< 0.0001	significant
A-Spirulina DB	5977,07	1	5977,07	603,15	< 0.0001	
B-ESP	105,13	1	105,13	10,61	0,0139	
C-TA	196,71	1	196,71	19,85	0,0030	
AB	373,84	1	373,84	37,72	0,0005	
AC	160,53	1	160,53	16,20	0,0050	
BC	10,02	1	10,02	1,01	0,3482	
A²	29,68	1	29,68	3,00	0,1271	
B²	182,99	1	182,99	18,47	0,0036	
C²	183,13	1	183,13	18,48	0,0036	
Residual	69,37	7	9,91			
Lack of Fit	69,37	3	23,12			
Pure Error	0,0000	4	0,0000			
Cor Total	7294,78	16				

Factor coding is **Coded**.

Sum of squares is **Type III - Partial**

The **Model F-value** of 81,01 implies the model is significant. There is only a 0,01% chance that an F-value this large could occur due to noise.

P-values less than 0,0500 indicate model terms are significant. In this case A, B, C, AB, AC, B², C² are significant model terms. Values greater than 0.1000 indicate the model terms are not significant. If there are many insignificant model terms (not counting those required to support hierarchy), model reduction may improve your model.

III.1.2.4. Validation du modèle par corrélation entre valeurs expérimentales et prédites

Le graphique d'adéquation « Predicted vs. Actual » (**Figure III.1**) constitue un indicateur de diagnostic fondamental pour valider l'exactitude du modèle des surfaces de réponse (RSM) appliqué au pourcentage de germination du blé dur (*Triticum durum*). L'examen visuel de cette figure montre une distribution linéaire stricte où la totalité des points expérimentaux se regroupe de manière compacte le long de la bissectrice à 45°, ce qui démontre empiriquement que les écarts entre les valeurs mesurées au laboratoire (Actual) et celles calculées par le modèle (Predicted) sont négligeables. Cette dispersion suit fidèlement le gradient de performance des traitements, s'étendant d'une zone bleue inhibitrice à faible

taux (10,67 % pour le traitement T15 à forte dose de spiruline) jusqu'à une zone rouge optimale à haut rendement (82,67 % pour T6 et T7 à faible dose de spiruline et fort apport d'ESP), tout en passant par une superposition quasi parfaite des points centraux en zone intermédiaire à 48,94 %. Cet ajustement graphique remarquable est soutenu par la robustesse des indices statistiques du modèle, notamment un coefficient de détermination élevé ($R^2 = 0,9905$), indiquant que 99,05 % de la variance est expliquée, une excellente concordance entre le R^2 ajusté (0,9783) et le R^2 prédit (0,8479), confirmant sa puissance prédictive, ainsi qu'un rapport signal/bruit optimal (Adeq Precision = 30,65), largement supérieur au seuil critique de 4. En somme, l'analyse de la **Figure III.1** valide mathématiquement la fiabilité des équations générées et confirme que le modèle peut être utilisé en toute confiance pour explorer l'espace expérimental et identifier les combinaisons optimales de bio-intrants.

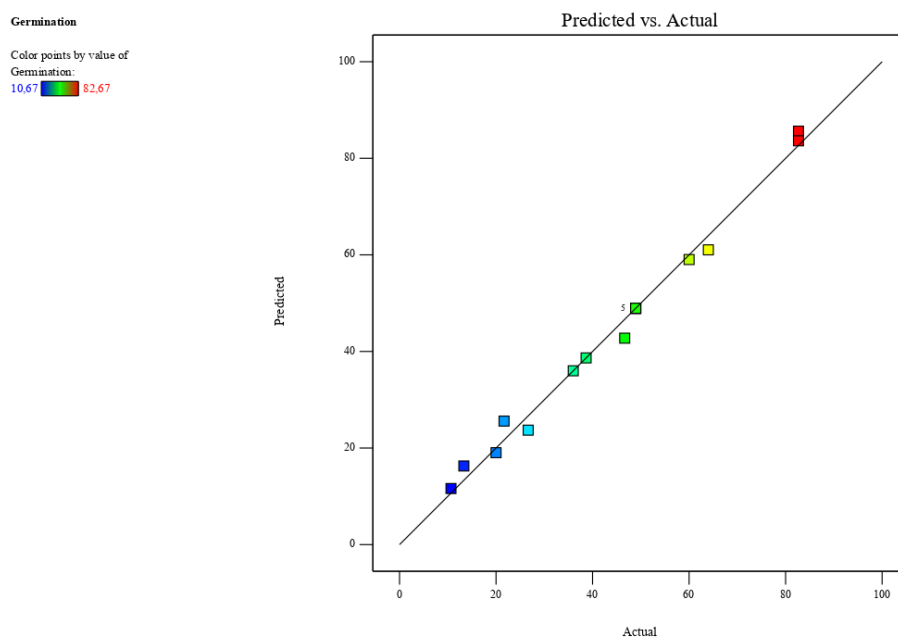


Figure III.1 : Graphique de corrélation entre les valeurs expérimentales (Actual) et les valeurs prédites (Predicted) du pourcentage de germination de *Triticum durum* par le modèle RSM.

III.1.2.5. Diagnostic des résidus et validation des hypothèses du modèle

Le graphique des résidus en fonction des valeurs prédites (**Figure III.2**) constitue un outil de diagnostic indispensable pour vérifier l'homogénéité de la variance et valider les hypothèses de base du modèle des surfaces de réponse (RSM). L'observation de cette **Figure**

III.2 montre une distribution totalement aléatoire et dispersée des points de part et d'autre de la ligne centrale zéro, sans aucune structure géométrique particulière ni tendance en forme d'entonnoir. Cette répartition fortuite, illustrée sur la **Figure III.2**, confirme graphiquement la constance de la variance des erreurs (homoscédasticité) tout au long du domaine expérimental étudié. De plus, le fait que l'intégralité des résidus observés sur la Figure III.2 reste confinée à l'intérieur des limites de contrôle critiques supérieure (+3) et inférieure (-3) atteste de l'absence de points aberrants (outliers) ou de données biaisées susceptibles de fausser l'analyse. Cette validation visuelle apportée par la Figure III.2 corrobore parfaitement la faible valeur du coefficient de variation ($CV = 7,16\%$) obtenue dans le bilan statistique, traduisant une excellente précision expérimentale et une haute reproductibilité des essais de germination sur le blé dur (*Triticum durum*). En conclusion, l'analyse de la **Figure III.2** confirme la validité statistique des résidus du modèle et démontre que les approximations mathématiques utilisées ne souffrent d'aucun biais systématique, consolidant ainsi la fiabilité des prédictions optimales.

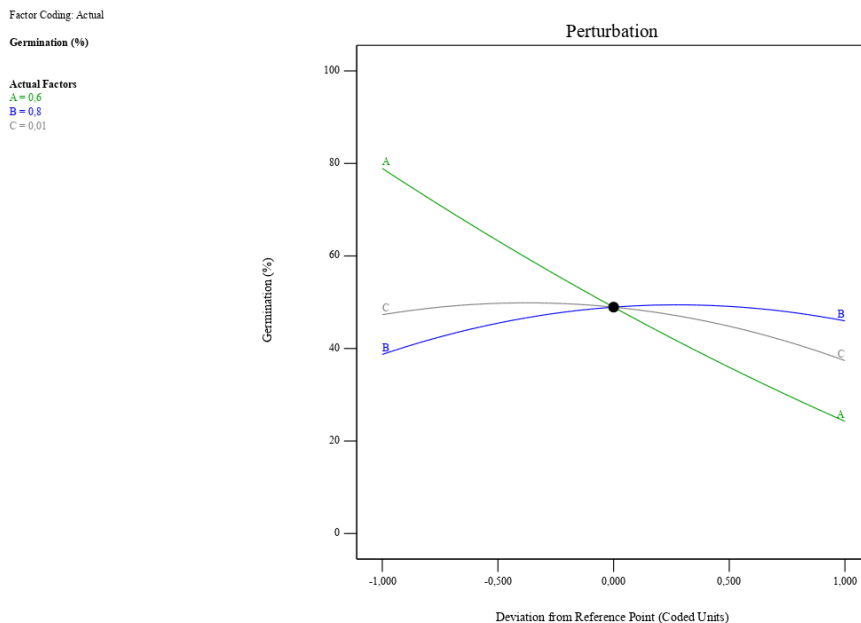


Figure III.2 : Graphique de distribution des résidus en fonction des valeurs prédites du pourcentage de germination de *Triticum durum*. La dispersion aléatoire des points à l'intérieur des limites de contrôle supérieure (+3) et inférieure (-3) confirme l'homoscédasticité (constance de la variance) et valide l'absence de biais systématique dans le modèle RSM.

III.1.2.6. Effet de l'interaction Spiruline – ESP sur le pourcentage de germination (surface de réponse 3D)

La représentation graphique en trois dimensions de la surface de réponse (**Figure III.3**) permet de visualiser l'effet combiné et l'interaction croisée entre la concentration en spiruline (facteur A) et la quantité de poudre de coquille d'œuf (facteur B, ESP) sur le taux de germination du blé dur (*Triticum durum*). L'analyse de cette figure montre une courbure prononcée de la surface, ce qui confirme visuellement la nature quadratique hautement significative du modèle mathématique ainsi que l'existence d'effets antagonistes et synergiques complexes. Comme l'illustre la **Figure III.3**, le pourcentage de germination maximal (zone rouge atteignant 82,67 %) est localisé à la convergence des faibles concentrations de spiruline (0,2 g) et des teneurs élevées en poudre de coquille d'œuf (0,8 g à 1,2 g). Cette configuration optimale suggère qu'un apport minéral calcique important issu de l'ESP stimule efficacement l'activité enzymatique embryonnaire, à condition que la dose de spiruline reste modérée afin d'éviter tout phénomène de saturation osmotique. À l'inverse, la pente descendante de la surface vers la zone bleue montre qu'une augmentation de la spiruline vers sa valeur maximale (1 g) entraîne une chute drastique du taux de germination (jusqu'à 10,67 %), et ce même en présence d'une quantité élevée d'ESP. En somme, l'examen de la **Figure III.3** valide graphiquement la forte interaction AB ($p = 0,0005$) révélée par l'analyse de variance, démontrant que l'efficacité bio-stimulante de la microalgue dépend strictement d'un équilibre nutritionnel précis avec le substrat calcique pour maximiser la levée de dormance des graines.

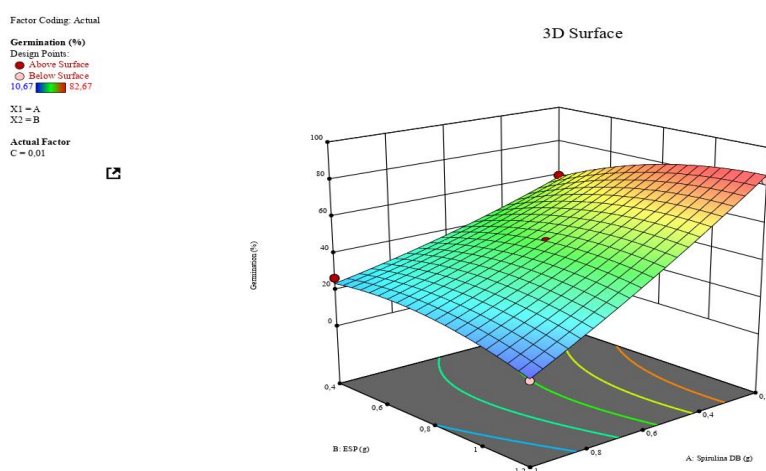


Figure III.3 : Surface de réponse en 3D représentant l'effet de l'interaction entre la concentration en Spiruline (A) et la quantité de poudre de coquille d'œuf (B) sur le pourcentage de germination de *Triticum durum* (pour une concentration fixe en acide tannique C = 0,01 g).

III.1.2.7. Effet de l'interaction Spiruline – ESP sur le pourcentage de germination (surface de réponse 3D)

La représentation graphique en trois dimensions de la surface de réponse (**Figure III.4**) permet d'analyser l'effet combiné et l'interaction croisée entre la concentration en spiruline (facteur A) et la quantité d'acide tannique (facteur C, TA) sur le taux de germination du blé dur (*Triticum durum*). L'examen de cette figure révèle une pente descendante marquée ainsi qu'une courbure significative le long des axes, confirmant visuellement l'existence d'une interaction AC critique ($p = 0,0050$) validée par l'analyse de variance. Comme le montre la **Figure III.4**, le niveau maximal de germination (zone rouge-orange supérieure à 80 %) est atteint lorsque la concentration en spiruline est maintenue à sa valeur minimale (0,2 g) et que l'acide tannique est appliqué à des doses faibles à modérées (0,005 g à 0,01 g). Cet équilibre suggère que les composés phénoliques de l'acide tannique agissent comme agents antioxydants protecteurs lors de l'imbibition embryonnaire, à condition que la dose de microalgue reste faible. À l'inverse, la surface évolue vers la zone bleue lorsque la spiruline augmente jusqu'à 1 g et que l'acide tannique atteint 0,015 g, entraînant une chute importante du taux de germination, pouvant descendre jusqu'à environ 10 à 20 %. En somme, la **Figure III.4** met en évidence que le potentiel bio-stimulant de la formulation dépend fortement de la dose de TA, un excès combiné des deux facteurs exerçant un effet inhibiteur synergique susceptible de perturber le métabolisme germinatif des graines.

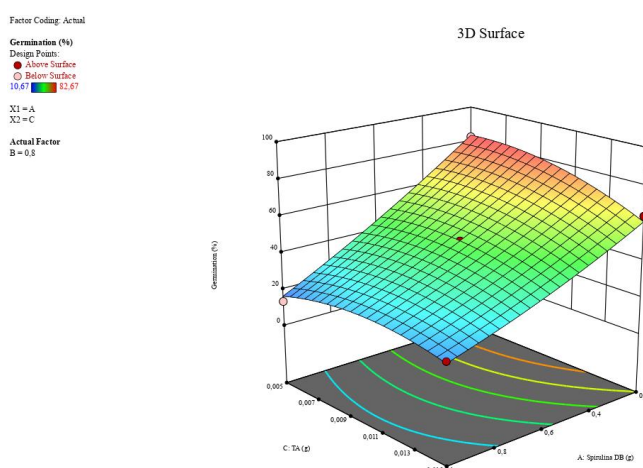


Figure III.4 : Surface de réponse en 3D représentant l'effet de l'interaction entre la concentration en Spiruline (A) et la quantité d'acide tannique (C) sur le pourcentage de germination de *Triticum durum* (pour une quantité fixe de poudre de coquille d'œuf B = 0,8 g).

III.1.2.8. Effet de l'interaction ESP – Acide tannique et identification du point optimal

La représentation graphique en trois dimensions de la surface de réponse (**Figure III.5**) permet d'étudier l'effet combiné et l'interaction croisée entre la quantité de poudre de coquille d'œuf (facteur B, ESP) et la concentration en acide tannique (facteur C, TA) sur le taux de germination du blé dur (*Triticum durum*). L'examen de cette **Figure III.5** révèle une forme de dôme symétrique, caractérisée par des courbures douces le long des deux axes. Cette configuration géométrique traduit visuellement l'existence d'effets quadratiques hautement significatifs (B^2 et C^2 , avec $p = 0,0036$ dans l'ANOVA), tout en confirmant l'absence d'une interaction croisée forte entre ces deux facteurs, comme l'indique la non-significativité du terme BC ($p = 0,3482$). Comme l'illustre la **Figure III.5**, la zone de réponse maximale (sommet du dôme, autour de 48,94 %) se situe de manière stable au centre du domaine expérimental, pour des valeurs intermédiaires d'ESP ($\approx 0,8$ g) et d'acide tannique ($\approx 0,010$ g). Cet agencement met en évidence l'existence de conditions optimales bien définies : un apport modéré en calcium (ESP) soutient efficacement le métabolisme de germination sans saturation du milieu, tandis qu'une dose intermédiaire de TA assure une protection antioxydante équilibrée de l'embryon. À l'inverse, les pentes descendantes de part et d'autre du dôme montrent qu'un éloignement de cette zone centrale, que ce soit par sous-dosage ou surdosage en ESP et en TA, entraîne une diminution progressive du taux de germination. En somme, la **Figure III.5** démontre la nécessité de maintenir un équilibre optimal entre la source minérale et l'agent phénolique afin de stabiliser le potentiel germinatif des graines lorsque la teneur en spiruline est fixée à une concentration moyenne.

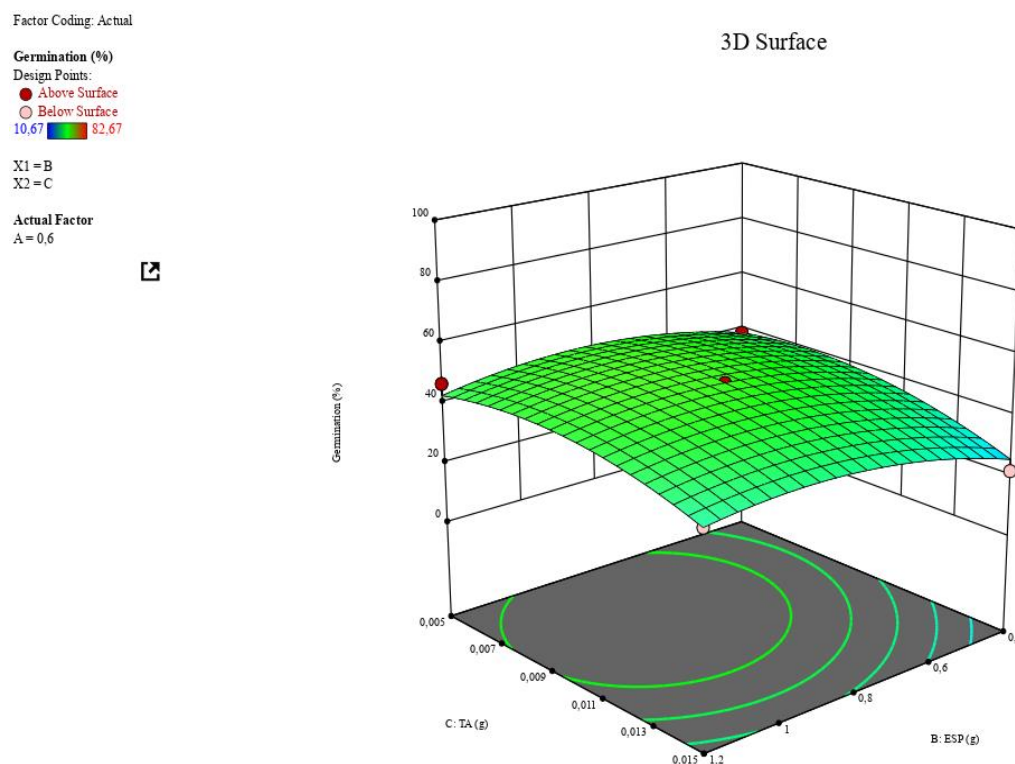


Figure III.5 : Surface de réponse en 3D représentant l'effet de l'interaction entre la quantité de poudre de coquille d'œuf (B) et la concentration en acide tannique (C) sur le pourcentage de germination de *Triticum durum* (pour une concentration fixe en Spiruline A = 0,6 g).

III.2. Discussion

Les résultats obtenus dans cette étude montrent clairement que les formulations composées de spiruline, de poudre de coquille d'œuf (ESP) et d'acide tannique influencent significativement la germination et la croissance initiale des plantules de blé dur (*Triticum durum*). Les différences observées entre les traitements traduisent l'existence d'interactions complexes entre les différents composants du mélange, dont les effets peuvent être soit stimulants, soit inhibiteurs selon les concentrations appliquées. De manière générale, l'absence de croissance observée durant les premiers jours d'incubation (J1 à J5) correspond probablement à la phase physiologique d'imbibition des graines et à l'activation progressive des enzymes impliquées dans la reprise du métabolisme germinatif. Cette phase est considérée comme essentielle pour la mobilisation des réserves nutritives et l'initiation de la croissance embryonnaire (Paparella et al., 2015).

Les traitements T6 et T7 ont présenté les meilleurs résultats aussi bien en termes de croissance des plantules que de pourcentage de germination, avec des valeurs maximales atteignant respectivement 82,67 % de germination et environ 1 cm de longueur au dixième jour d'incubation. Ces traitements étaient caractérisés par de faibles concentrations de spiruline (0,2 g), associées à des quantités modérées ou élevées de poudre de coquille d'œuf et à de faibles teneurs en acide tannique. Ces résultats suggèrent qu'une faible dose de spiruline agit comme un bio-stimulant capable d'améliorer l'activité métabolique des graines sans provoquer de stress physiologique. La spiruline est reconnue pour sa richesse en protéines, acides aminés essentiels, vitamines, pigments photosynthétiques et substances bioactives pouvant stimuler la germination et la croissance végétale (Akgül, 2019). Des travaux antérieurs ont montré que les extraits de *Spirulina platensis* améliorent significativement la germination, la vigueur des plantules et le développement racinaire chez plusieurs espèces céréalières grâce à leurs propriétés nutritives et antioxydantes (Shehawy et al., 2021).

L'effet positif observé avec les traitements riches en poudre de coquille d'œuf peut être attribué à la richesse de ce matériau en calcium et en éléments minéraux essentiels. Le calcium joue un rôle fondamental dans plusieurs mécanismes physiologiques impliqués dans la germination, notamment la stabilité des membranes cellulaires, l'activation enzymatique et la division cellulaire (Hepler, 2005). Dans cette étude, les traitements contenant des concentrations élevées d'ESP, notamment T7 et T13, ont montré une amélioration notable de la croissance des plantules et du pourcentage de germination. Ces observations indiquent que la poudre de coquille d'œuf pourrait constituer une source minérale naturelle favorable au développement embryonnaire et à l'élongation des jeunes tissus végétaux.

Les résultats montrent également que l'acide tannique influence fortement la réponse germinative des graines de blé dur. Les faibles concentrations de TA (0,005 à 0,01 g) semblent favoriser la germination et la croissance des plantules, tandis que des concentrations plus élevées entraînent une diminution progressive des performances physiologiques. Cette réponse pourrait être liée aux propriétés antioxydantes des composés phénoliques présents dans l'acide tannique. À faibles doses, ces composés peuvent protéger les cellules embryonnaires contre les dommages oxydatifs générés durant la germination et améliorer ainsi la viabilité des graines (Michalak, 2006). En revanche, des concentrations excessives de composés phénoliques peuvent exercer des effets allélopathiques ou inhiber certaines enzymes impliquées dans le métabolisme germinatif (Li et al., 2010).

Les résultats de l'analyse statistique confirment fortement ces observations biologiques. Le modèle quadratique obtenu par la méthodologie des surfaces de réponse (RSM) a montré une excellente qualité d'ajustement avec un coefficient de détermination très élevé ($R^2 = 0,9905$), indiquant que plus de 99 % de la variabilité du pourcentage de germination est expliquée par le modèle. Cette valeur élevée traduit une forte précision prédictive et une bonne adéquation entre les valeurs expérimentales et les valeurs calculées. Selon Montgomery (2017), des valeurs élevées de R^2 associées à de faibles coefficients de variation témoignent généralement d'une grande fiabilité expérimentale et d'une bonne stabilité du modèle mathématique utilisé dans les études d'optimisation.

L'analyse de variance (ANOVA) a montré que la spiruline constitue le facteur le plus influent sur la germination des graines, avec une valeur de F très élevée (603,15 ; $p < 0,0001$). Ce résultat confirme que la concentration de spiruline joue un rôle déterminant dans la réponse physiologique des graines de blé dur. Les interactions significatives observées entre la spiruline et la poudre de coquille d'œuf (AB), ainsi qu'entre la spiruline et l'acide tannique (AC), montrent que l'effet bio-stimulant de la spiruline dépend fortement des concentrations des autres composants du mélange. Ces résultats sont cohérents avec plusieurs travaux montrant que les bio-stimulants naturels présentent souvent des effets synergiques ou antagonistes selon les proportions utilisées et les conditions du milieu (Calvo et al., 2014).

Les surfaces de réponse en trois dimensions ont permis de visualiser clairement ces interactions. La **Figure III.3** montre que les meilleures performances germinatives sont obtenues lorsque de faibles concentrations de spiruline sont associées à des teneurs élevées en ESP. Cette configuration suggère qu'un apport important en calcium améliore l'activité enzymatique et les mécanismes physiologiques de la germination à condition que la concentration de spiruline reste modérée. En revanche, les fortes concentrations de spiruline entraînent une diminution importante du taux de germination, probablement en raison d'un déséquilibre osmotique ou d'une saturation du milieu de germination. Des effets similaires ont été observés dans des études portant sur l'application excessive d'extraits algaux chez les céréales (Akgül, 2019).

La **Figure III.4** met également en évidence une interaction importante entre la spiruline et l'acide tannique. Les meilleurs taux de germination ont été observés lorsque la spiruline et l'acide tannique étaient appliqués à faibles concentrations. Cette interaction

suggère que les composés phénoliques de l'acide tannique peuvent agir comme agents protecteurs contre le stress oxydatif durant l'imbibition, mais qu'un excès combiné de spiruline et de TA peut devenir inhibiteur pour le métabolisme germinatif. Enfin, **la Figure III.5** montre que les concentrations intermédiaires d'ESP et de TA permettent de maintenir une stabilité optimale du potentiel germinatif, confirmant l'existence d'un équilibre nutritionnel et physiologique nécessaire au développement normal des graines. Globalement, cette étude démontre que l'utilisation combinée de spiruline, de poudre de coquille d'œuf et d'acide tannique peut améliorer significativement la germination et la croissance initiale du blé dur lorsque les concentrations appliquées sont correctement équilibrées. Ces résultats mettent en évidence le potentiel des bio-intrants naturels comme alternative durable aux fertilisants et stimulateurs de croissance conventionnels dans les systèmes agricoles modernes.

Conclusion

Cette étude a permis de mettre en évidence l'intérêt de la valorisation des déchets organiques et des biomasses naturelles dans le développement de solutions agricoles durables et respectueuses de l'environnement. L'évaluation de différentes formulations à base de poudre de coquille d'œuf, de spiruline (*Spirulina platensis*) et d'acide tannique a démontré que ces bio-intrants naturels exercent une influence significative sur le pouvoir germinatif et la croissance initiale du blé dur (*Triticum durum*). Les résultats obtenus ont révélé que certaines formulations, notamment les traitements T6 et T7, favorisent considérablement la germination des graines ainsi que le développement précoce des plantules. Ces performances semblent être liées à un équilibre optimal entre les composants des mélanges, caractérisé par de faibles concentrations de spiruline, des teneurs modérées ou élevées en poudre de coquille d'œuf et de faibles doses d'acide tannique.

L'analyse statistique réalisée à l'aide de la méthodologie des surfaces de réponse (RSM) et de l'ANOVA a confirmé la forte fiabilité du modèle expérimental ainsi que l'importance des interactions entre les différents facteurs étudiés. Les résultats indiquent également que la spiruline constitue le facteur le plus déterminant dans la réponse germinative, tandis que la poudre de coquille d'œuf agit probablement comme une source minérale naturelle riche en calcium capable de stimuler les mécanismes physiologiques impliqués dans la germination. De son côté, l'acide tannique semble exercer un effet bénéfique à faibles concentrations grâce à ses propriétés antioxydantes, alors que des doses élevées peuvent provoquer un effet inhibiteur.

Au-delà des résultats agronomiques obtenus, cette étude met en évidence l'importance de l'économie circulaire et de la réutilisation des déchets biodégradables dans les systèmes agricoles modernes. La transformation des coquilles d'œuf en bio-fertilisants naturels représente une stratégie écologique permettant à la fois de réduire les déchets organiques et de limiter l'utilisation des fertilisants chimiques conventionnels. De même, l'utilisation de la spiruline comme bio-stimulant ouvre des perspectives intéressantes dans le domaine de l'agriculture biologique et durable.

Dans une perspective future, il serait intéressant d'approfondir cette recherche par des essais en conditions de serre et en plein champ afin de confirmer l'efficacité des formulations optimisées dans des conditions environnementales réelles. Des études complémentaires pourraient également être consacrées à l'évaluation de l'effet de ces bio-intrants sur d'autres paramètres physiologiques et biochimiques des plantes, tels que la photosynthèse, l'activité enzymatique, la teneur en chlorophylle ou la résistance aux stress abiotiques. Par ailleurs, l'identification des mécanismes moléculaires impliqués dans l'action synergique de la spiruline, de la poudre de coquille d'œuf et de l'acide tannique constituerait une étape importante pour mieux comprendre leur mode d'action sur la germination et la croissance végétale. Enfin, l'extension de cette approche à d'autres espèces cultivées pourrait contribuer au développement de nouvelles alternatives biologiques et écologiques capables d'améliorer durablement la productivité agricole tout en préservant les ressources naturelles et l'équilibre des écosystèmes.

Références

- Ahmed, T. A., Wu, L., Younes, M., & Hincke, M. (2021). Biotechnological applications of eggshell : Recent advances. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9, 675364.
- Al-Ramamneh, E. A.-D. M. (2024). *Ascophyllum nodosum* and *Spirulina platensis* affect plant growth, yield, concentration of hormones in the leaves and nematode communities in the rhizosphere of cucumber plants. *Biological Agriculture & Horticulture*, 40(2), 92-106. <https://doi.org/10.1080/01448765.2023.2285747>
- Chu, W.-L., Lim, Y.-W., Radhakrishnan, A. K., & Lim, P.-E. (2010). Protective effect of aqueous extract from *Spirulina platensis* against cell death induced by free radicals. *BMC Complementary and Alternative Medicine*, 10(1), 53. <https://doi.org/10.1186/1472-6882-10-53>
- Fais, G., Manca, A., Bolognesi, F., Borselli, M., Concas, A., Busutti, M., Broggi, G., Sanna, P., Castillo-Aleman, Y. M., & Rivero-Jiménez, R. A. (2022). Wide range applications of spirulina : From earth to space missions. *Marine Drugs*, 20(5), 299.
- Gautron, J., Stapane, L., Le Roy, N., Nys, Y., Rodriguez-Navarro, A. B., & Hincke, M. T. (2021). Avian eggshell biomineralization : An update on its structure, mineralogy and protein tool kit. *BMC Molecular and Cell Biology*, 22(1), 11. <https://doi.org/10.1186/s12860-021-00350-0>
- Indhumathi, T., & Ramya, M. (2020). Application of *Arthrospira platensis* (*Spirulina*) as biofertilizer for sustainable agriculture. *J. Algal Biomass Util*, 11, 33-40.
- Khan, Z., Bhadouria, P., & Bisen, P. S. (2005). Nutritional and therapeutic potential of *Spirulina*. *Current pharmaceutical biotechnology*, 6(5), 373-379.
- Kulshreshtha, G., Ward, C., Calvert, N. D., Benavides-Reyes, C., Rodriguez-Navarro, A. B., Diep, T., & Hincke, M. T. (2024). Effect of egg washing and hen age on cuticle quality and bacterial adherence in table eggs. *Microorganisms*, 12(10), 2027.

Akgül, F. (2019). Effects of *Spirulina platensis* on seed germination and seedling growth in wheat and barley. *Alinteri Journal of Agriculture Sciences*, 34(2), 148–154.

Calvo, P., Nelson, L., & Kloepper, J. W. (2014). Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant and Soil*, 383, 3–41.

Hepler, P. K. (2005). Calcium: A central regulator of plant growth and development. *The Plant Cell*, 17(8), 2142–2155.

Li, Z. H., Wang, Q., Ruan, X., Pan, C. D., & Jiang, D. A. (2010). Phenolics and plant allelopathy. *Molecules*, 15(12), 8933–8952.

Michalak, A. (2006). Phenolic compounds and their antioxidant activity in plants growing under heavy metal stress. *Polish Journal of Environmental Studies*, 15(4), 523–530.

Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments* (9th ed.). John Wiley & Sons.

Paparella, S., Araújo, S. S., Rossi, G., Wijayasinghe, M., Carbonera, D., & Balestrazzi, A. (2015). Seed priming: State of the art and new perspectives. *Plant Cell Reports*, 34, 1281–1293.

Shehawy, A. A., Eisa, S. S., & Abdelraouf, R. E. (2021). Impact of *Spirulina platensis* extract on growth and physiological performance of wheat plants. *Journal of Applied Phycology*, 33, 375–386.

Abreu, A. P., Martins, R., & Nunes, J. (2023). Emerging applications of *Chlorella* sp. And *Spirulina* (Arthrospira) sp. *Bioengineering*, 10(8), 955.

Agnol, L. D., Neves, R. M., Maraschin, M., Moura, S., Ornaghi Jr, H. L., Dias, F. T. G., & Bianchi, O. (2021). Green synthesis of *Spirulina*-based carbon dots for stimulating agricultural plant growth. *Sustainable Materials and Technologies*, 30, e00347.

Alobwede, E., Leake, J. R., & Pandhal, J. (2019). Circular economy fertilization : Testing micro and macro algal species as soil improvers and nutrient sources for crop production in greenhouse and field conditions. *Geoderma*, 334, 113-123.

Al-Ramamneh, E. A.-D. M. (2024). *Ascophyllum nodosum* and *Spirulina platensis* affect plant growth, yield, concentration of hormones in the leaves and nematode

- communities in the rhizosphere of cucumber plants. *Biological Agriculture & Horticulture*, 40(2), 92-106. <https://doi.org/10.1080/01448765.2023.2285747>
- Baghdadabad, M. D., Naderi, N., Atabaki, V., Faramarzi, M. A., Tabar zad, M., & Hosseinabadi, T. (2023). The analgesic and anti-inflammatory effects of partially purified polysaccharide fractions of cell-free medium and biomass of *Spirulina platensis* PCST5. *Iranian Journal of Pharmaceutical Research: IJPR*, 22(1), e136661.
- Bobescu, E., Bălan, A., Moga, M. A., Teodorescu, A., Mitrică, M., & Dima, L. (2020). Are there any beneficial effects of spirulina supplementation for metabolic syndrome components in postmenopausal women? *Marine drugs*, 18(12), 651.
- Bortolini, D. G., Maciel, G. M., Fernandes, I. de A. A., Pedro, A. C., Rubio, F. T. V., Branco, I. G., & Haminiuk, C. W. I. (2022). Functional properties of bioactive compounds from *Spirulina* spp. : Current status and future trends. *Food Chemistry: Molecular Sciences*, 5, 100134.
- Chu, W.-L., Lim, Y.-W., Radhakrishnan, A. K., & Lim, P.-E. (2010). Protective effect of aqueous extract from *Spirulina platensis* against cell death induced by free radicals. *BMC Complementary and Alternative Medicine*, 10(1), 53. <https://doi.org/10.1186/1472-6882-10-53>
- Fais, G., Manca, A., Bolognesi, F., Borselli, M., Concas, A., Busutti, M., Broggi, G., Sanna, P., Castillo-Aleman, Y. M., & Rivero-Jiménez, R. A. (2022). Wide range applications of spirulina : From earth to space missions. *Marine Drugs*, 20(5), 299.
- Huang, H., Liao, D., Pu, R., & Cui, Y. (2018). Quantifying the effects of spirulina supplementation on plasma lipid and glucose concentrations, body weight, and blood pressure. *Diabetes, Metabolic Syndrome and Obesity: Targets and Therapy, Volume 11*, 729-742. <https://doi.org/10.2147/DMSO.S185672>

- Iamtham, S., & Sornchai, P. (2022). Biofixation of CO₂ from a power plant through large-scale cultivation of *Spirulina maxima*. *South African Journal of Botany*, 147, 840-851.
- Kumar, D., Kumar, N., Pabbi, S., Walia, S., & Dhar, D. W. (2013). Protocol optimization for enhanced production of pigments in *Spirulina*. *Indian Journal of Plant Physiology*, 18(3), 308-312. <https://doi.org/10.1007/s40502-013-0045-8>
- Li, T.-T., Liu, Y.-Y., Wan, X.-Z., Huang, Z.-R., Liu, B., & Zhao, C. (2018). Regulatory efficacy of the polyunsaturated fatty acids from microalgae *Spirulina platensis* on lipid metabolism and gut microbiota in high-fat diet rats. *International journal of molecular sciences*, 19(10), 3075.
- Maleš, Ž., Friščić, M., Duka, I., & Mišković, G. (2019). *Spirulina-ljekovita cijanobakterija*. <https://repozitorij.pharma.unizg.hr/object/pharma:1130>
- Mogale, M. (2016). *Identification and quantification of bacteria associated with cultivated Spirulina and impact of physiological factors*. <https://open.uct.ac.za/handle/11427/22921>
- Mohammadi, M., Soltanzadeh, M., Ebrahimi, A. R., & Hamishehkar, H. (2022). *Spirulina platensis* protein hydrolysates : Techno-functional, nutritional and antioxidant properties. *Algal Research*, 65, 102739.
- Musa, M. N., Jirgi, G. M., Zango, Z. U., Isa, M. N., Abdurrazak, M., Adamu, A. A., Wadi, I. A., Adeleke, A. A., Garba, Z. N., Bello, U., Adamu, H., Hosseini-Bandegharai, A., & Bokov, D. O. (2025). A review on techno-economic assessment of *Spirulina* for sustainable nutraceutical, medicinal, environmental, and bioenergy applications. *Bioresources and Bioprocessing*, 12(1), 51. <https://doi.org/10.1186/s40643-025-00888-3>
- Oyebiyi, O. O., Laezza, A., Hoque, M. M., Thammavongsa, S., Li, M., Tsipas, S., Tasiopoulos, A. J., Scopa, A., & Drosos, M. (2026). Organic Amendments for

- Sustainable Agriculture : Effects on Soil Function, Crop Productivity and Carbon Sequestration Under Variable Contexts. *C*, 12(1), 7.
- Perera, I. A., Abinandan, S., Panneerselvan, L., Subashchandrabose, S. R., Venkateswarlu, K., Naidu, R., & Megharaj, M. (2022). Co-culturing of microalgae and bacteria in real wastewaters alters indigenous bacterial communities enhancing effluent bioremediation. *Algal Research*, 64, 102705.
- Prete, V., Abate, A. C., Di Pietro, P., De Lucia, M., Vecchione, C., & Carrizzo, A. (2024). Beneficial effects of spirulina supplementation in the management of cardiovascular diseases. *Nutrients*, 16(5), 642.
- Rojas, D., Vargas, G., & Saénz, A. (2017). Evaluación del crecimiento de *Spirulina platensis* UTEX 1926 cultivada en medios salinos, utilizando CO₂ como fuente de carbono. *Universidad EAFIT*. <https://repository.eafit.edu.co/bitstreams/af883fa5-6d23-49d1-ad0b-594cdb8b1e9a/download>
- Tavakoli, Z., Kavooosi, G., Siahbalei, R., & Karimi, J. (2025). *Spirulina maxima* as a valuable ingredient : Determination of broad fatty acid and amino acid profiles and nutritional quality and anti-amylase capacity. *Applied Food Research*, 5(1), 100741.
- Yadav, P., Singh, R. P., Rana, S., Joshi, D., Kumar, D., Bhardwaj, N., Gupta, R. K., & Kumar, A. (2022). Mechanisms of stress tolerance in cyanobacteria under extreme conditions. *Stresses*, 2(4), 531-549.