

République Algérienne Démocratique et Populaire

Université Abdelhamid
Ibn Badis-Mostaganem
Faculté des Sciences de la
Nature et de la Vie



جامعة عبد الحميد بن باديس
مستغانم
كلية علوم الطبيعة والحياة

DEPARTEMENT DES SCIENCES AGRONOMIQUES

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Présenté par

BENYMNA SARRA

CHEIKH HAMAHOALLAH OUMAR CISSOKO

Pour l'obtention du diplôme de

MASTER EN PRODUCTION VÉGÉTALE

Spécialité: Production végétale

THÈME

**EFFETS DES EXTRAITS DE LA SPIRULINE *SPIRULINA*
PLATENSIS SUR LES DEFENSES NATURELLES DES
PLANTES.**

Soutenue le .././2024

DEVANT LE JURY

Président	Benguendouz Abdenour	MCB	UAB. Mostaganem
Examinateur	Meliani Hadj Ahmed	MAA	U. Mostaganem
Encadreur	Arbaoui Mohamed	MCA	UAB. Mostaganem
Co-Encadreur	Benabdelmoumene Djilali	MCA	UAB. Mostaganem

Année Universitaire: 2023-2024

Remerciements

Je remercie avant tout ALLAH tout puissant de m'avoir guidé toutes les années d'étude et m'avoir donné la volonté, la patience et le courage pour terminer ce travail. J'exprime mes profonds remerciements à nos encadreurs messieurs Arbaoui Mohamed et Benabdelmoumene Djilali qui nous ont accordé l'honneur de diriger ce travail.

À monsieur Benguendouz Abdenour Amine
d'avoir accepté de présider ce jury

Également nos remerciements à Mr Meliani Hadj
Ahmed notre examinateur

Nous tenons également à remercier l'ensemble des personnels de la ferme de nous avoir accueillis dans la ferme agricole et d'y avoir accepté la réalisation de notre travail avec leurs aides aimables. Mes sincères remerciements vont également aux membres de jury et au président d'avoir accepté l'évaluation de ce modeste travail.

Dédicace

Tout d'abord, je tiens à remercier DIEU de m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Je tiens à dédier cet humble travail aux personnes les plus chères au monde, à mes très chers parents : ma mère AIDA et mon père ABD ELKRIM. Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour et ma profonde gratitude pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance. Que ce travail soit le fruit de vos prières et sacrifices, qui m'ont été d'un grand secours pour atteindre cette étape de ma vie, et que Dieu tout puissant vous procure santé, bonheur et longue vie.

À mes chères sœurs IKRAM, KAOUTHER et à mon petit frère YUCEF AMINE. Je vous souhaite la réussite dans votre vie, avec tout le bonheur qu'il faut pour vous combler.

À toute ma famille.

À ma chère amie BELGACEMI NOUR EL HOUDA pour ta précieuse amitié et ton soutien inestimable.

À mon binôme HAMALLAH OUMAR CISSOKO avec laquelle j'ai partagé ce travail.

BENYMNA SARRA

Dédicace

Louange à ALLAH Tout-Puissant, qui m'a permis de terminer ce mémoire.

Je dédie ce travail à mes parents Oumar Cissoko (paix à son âme) et Zeinab Cissoko qui ont toujours été un soutien et un encouragement dans tout ce que j'ai entrepris. Grâce à leur enseignement exceptionnel et leur amour infini, j'ai réussi à accomplir beaucoup de choses dans ma vie. Je suis très reconnaissant pour cet amour qui remplit leurs cœurs et qui ne cesse de me soutenir et de m'encourager, peu importe les difficultés que je peux rencontrer. Je ne peux pas exprimer ma gratitude suffisamment, c'est pourquoi j'ai voulu offrir ce travail en guise de remerciement et pour me rappeler que leur amour me donne la force de continuer à avancer dans la vie. Je vous aime.

Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma considération et mes profonds sentiments envers eux pour son soutien et ses encouragements, je lui témoigne mon grand respect

Mes tantes : **zeinab Coulibaly et Hawa Konaté**

Mes frères : **mattallah cissoko ; eby cissoko ; moussa cissoko ; cheikhnaliou cissoko**

Mes chères sœurs : **dancko cissoko maniouma cissoko coumba cissoko**

Mes cousines et mes cousins : **araba diara billaly cissoko**

Mes amies: **moktar fall; ahmed salim ; mouhamed ba**

À mon binôme **Sarra Benymna et krimou.**

À tous mes amis et mes collègues enfin, à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

CHEIKH HAMAHOALLAH

Résumé

Cette étude explore les effets biostimulants des extraits de *Spirulina platensis* sur la croissance et le rendement des plants de poivron (*Capsicum annuum*), dans l'optique de proposer une alternative naturelle aux pesticides et fertilisants chimiques. Trois concentrations d'extraits de spiruline (5 %, 10 %, et 15 %) ont été testées, avec un groupe témoin non traité comme référence. Les principaux paramètres mesurés incluent la longueur des tiges, la taille des feuilles, le nombre de fleurs, de fruits et le poids moyen des fruits. Les résultats montrent un impact significatif des extraits de spiruline sur la croissance des plants. La concentration de 15 % a donné les meilleurs résultats, avec une augmentation de la longueur des tiges (+25 %), de la taille des feuilles (+30 %), et du nombre de fleurs et de fruits par plant (+35 %) par rapport au témoin. Le poids moyen des fruits a augmenté de 20 % pour les plants traités aux concentrations de 10 % et 15 %. Le rendement global par plant a été maximisé à 15 %, avec une augmentation de près de 40 % par rapport au témoin. Ces résultats démontrent que l'utilisation d'extraits de *Spirulina platensis* peut stimuler efficacement la croissance et la productivité des cultures de poivrons, offrant ainsi une alternative prometteuse pour réduire la dépendance aux intrants chimiques et promouvoir une agriculture durable. L'adoption de ces biofertilisants naturels à grande échelle pourrait constituer une avancée importante pour l'agriculture écologique.

Mots clés : Extrait ; biostimulant ; biofertilisant ; *Capsicum annuum*; *Spirulina platensis*.

Summary

This study explores the biostimulant effects of *Spirulina platensis* extracts on the growth and yield of pepper plants (*Capsicum annuum*), with the aim of providing a natural alternative to chemical pesticides and fertilizers. Three concentrations of spirulina extract (5%, 10%, and 15%) were tested, with an untreated control group as a reference. The main parameters measured included stem length, leaf size, number of flowers, number of fruits, and average fruit weight. The results showed a significant positive impact of spirulina extracts on plant growth. The 15% concentration yielded the best results, with an increase in stem length (+25%), leaf size (+30%), and the number of flowers and fruits per plant (+35%) compared to the control. The average fruit weight increased by 20% for plants treated with 10% and 15% concentrations. The overall yield per plant was maximized at 15%, showing an increase of nearly 40% compared to the control. These results demonstrate that the use of *Spirulina platensis* extracts can effectively stimulate the growth and productivity of pepper crops, offering a promising alternative to reduce dependence on chemical inputs and promote sustainable agriculture. The large-scale adoption of these natural biofertilizers could represent a significant advancement for ecological farming.

Keywords : Extract; biostimulant; biofertilizer; *Capsicum annuum* ; *Spirulina platensis*.

ملخص

تستكشف هذه الدراسة التأثيرات المحفزة للنمو لمستخلصات *Spirulina platensis* على نمو وإنتاجية نباتات الفلفل (*Capsicum annuum*) بهدف تقديم بديل طبيعي للمبيدات والأسمدة الكيميائية. تم اختبار ثلاثة تراكيز من مستخلصات السبيرولينا (5%، 10%، و15%) مع مجموعة ضابطة غير معالجة كمرجع. تشمل المعايير الرئيسية التي تم قياسها طول السيقان، حجم الأوراق، عدد الأزهار، عدد الثمار، ومتوسط وزن الثمار.

أظهرت النتائج تأثيرًا إيجابيًا ملحوظًا لمستخلصات السبيرولينا على نمو النباتات. حقق التركيز 15% أفضل النتائج، حيث زاد طول السيقان بنسبة (+25%)، وحجم الأوراق بنسبة (+30%)، وعدد الأزهار والثمار لكل نبات بنسبة (+35%) مقارنةً بالمجموعة الضابطة. كما زاد متوسط وزن الثمار بنسبة 20% في النباتات المعالجة بتراكيز 10% و15%. وقد تم تحقيق أقصى إنتاجية لكل نبات مع التركيز 15%، حيث زادت الإنتاجية بحوالي 40% مقارنةً بالمجموعة الضابطة.

تُظهر هذه النتائج أن استخدام مستخلصات *Spirulina platensis* يمكن أن يحفز نمو وإنتاجية محاصيل الفلفل بشكل فعال، مما يوفر بديلاً واعدًا للحد من الاعتماد على المدخلات الكيميائية وتعزيز الزراعة المستدامة. إن تبني هذه الأسمدة الحيوية الطبيعية على نطاق واسع قد يمثل تقدمًا كبيرًا في الزراعة البيئية.

الكلمات المفتاحية: مستخلص؛ محفز حيوي؛ سماد حيوي؛ *Spirulina platensis*؛ *Capsicum annuum*

Liste des tableaux

TABLEAU 1: CLASSEMENT DES PAYS PRODUCTEURS DU POIVRON DANS LE MONDE (FAO, 2016)	2
TABLEAU 2: SUPERFICIES ET RENDEMENTS DU POIVRON SOUS SERRE EN ALGERIE (2006-2013) (FAO, 2015).	2
TABLEAU 3 : QUELQUES MALADIES CRYPTOGRAMIQUES DU POIVRON (ONTARIO, 2009	7
TABLEAU 4 : EXEMPLES DE MALADIES VIRALES DU POIVRON (ONTARIO, 2009)	9
TABLEAU 5 : POURCENTAGE MOYEN DES ACIDES AMINES DE SPIRULINA PLANTENSIS (BROWITZKA, 1988).	11
TABLEAU 6 : COMPOSITION TYPIQUE EN POURCENTAGE DES PRINCIPAUX ACIDES GRAS DE 3 ESPECES DE SPIRULINE D'APRES (PASCAUD ET AL., 1993).	12
TABLEAU 7 : TENEUR EN ACIDES NUCLEIQUES DE QUELQUES ALIMENTS (FALQUET ET HURNI 1986).	14
TABLEAU 8 : TENEUR EN VITAMINES EN MG/G DE MATIERE SECHE DE SPIRULINE (FALQUET ET HURNI 1986).	15
TABLEAU 9: ANALYSE TYPIQUE DES MINERAUX DANS LA SPIRULINE (MG/KG) (FALQUET ET HURNI 1986).	18
TABLEAU 10: TENEURS EN PIGMENTS EXPRIMEES EN MG POUR 10G DE MATIERE SECHE DE SPIRULINA PLANTENSIS (PIERLOVISI, 2007).	20
TABLEAU 11 : COMPOSITION DU MILIEU DE ZARROUK (POUR UN LITRE D'EAU DISTILLEE)	33
TABLEAU 12: DISPOSITIF EXPERIMENTAL	37
TABLEAU 13 : ANALYSE DE VARIANCE A 1 FACTEUR A P=5% DE LA LONGUEUR DE LA TIGE DE POIVRON « CAPSICUM ANNUUM L. » TRAITEE AVEC DE LA SPIRULINE.	43
TABLEAU 14 : ANALYSE DE VARIANCE A 1 FACTEUR A P=5% DE LA TAILLE DES FEUILLES PAR PLANT DE LA VARIETE VENUS 60 « CAPSICUM ANNUUM L. » TRAITEE AVEC DE LA SPIRULINE.	44
TABLEAU 15 : ANALYSE DE VARIANCE A 1 FACTEUR A P=5% DE NOMBRE DE FEUILLES PAR PLANT DE POIVRON « CAPSICUM ANNUUM L. » TRAITEES AVEC DE LA SPIRULINE.	45
TABLEAU 16: ANALYSE DE VARIANCE A 1 FACTEUR A P=5% POUR LE NOMBRE DE FLEURS PAR PLANT DE POIVRON « CAPSICUM ANNUUM L. » TRAITEES AVEC DE LA SPIRULINE. ...	46
TABLEAU 17: ANALYSE DE VARIANCE A 1 FACTEUR A P=5% NOMBRE DE FRUITS PAR PLANT DE POIVRON « CAPSICUM ANNUUM L. » TRAITE AVEC DE LA SPIRULINE	47
TABLEAU 18 : ANALYSE DE VARIANCE A 1 FACTEUR A P=5% POUR LE POIDS MOYEN DU FRUIT PAR PLANT DE POIVRON « CAPSICUM ANNUUM L. » TRAITE AVEC DE LA SPIRULINE.	48
TABLEAU 19 : ANALYSE DE VARIANCE A 1 FACTEUR A P=5% POUR LE RENDEMENT MOYEN DU FRUIT PAR PLANT DE POIVRON « CAPSICUM ANNUUM L. » TRAITE AVEC DE LA SPIRULINE.	48

Liste des figures

FIGURE 1 : VUE GENERALE DE LA PLANTE DU POIVRON DANS UNE ABRI-SERRE	3
FIGURE 2 : CONSTITUANTS DU POIVRON (FEUILLE, FLEUR, FRUIT ET TIGE D'UN POIVRON	5
FIGURE 3 : LES VALEURS NUTRITIVES PRESENTES DANS 10 G DE SPIRULINE (FALQUET ET HURNI 1986).	20
FIGURE 4 : ASPECT MICROSCOPIQUE DE L'ARTHROSPIRA PLATENSIS (VICENETE, 2008)	26
FIGURE 5 : MORPHOLOGIES TYPIQUES DE SPIRULINE (SOURCE : ANTENNA TECHNOLOGIE) ...	27
FIGURE 6 : CYCLE DE VIE DE LA SPIRULINE (CHARPY, 2008)	27
FIGURE 7 : ZONE DE CROISSANCE NATURELLE DE LA SPIRULINE DANS LE MONDE (FOX, 1999)	28
FIGURE 8 : SPIRULINE SOLUTION MERE (SPIRULINA PLANTESIS) SOUS FORME LIQUIDE (ORIGINALE, 2024)	32
FIGURE 9 : PREPARATION DU MILIEU DE CULTURE (ORIGINALE, 2024)	33
FIGURE 10 : A ET B PREPARATION DE LA SOLUTION DE LA SPIRULINE (ORIGINALE, 2024)	35
FIGURE 11 : SPIRULINE VUE AU MICROSCOPE (ORIGINALE, 2024)	35
FIGURE 12 : ÉTAPES DE LA RECOLTE DE LA SPIRULINE (ORIGINALE, 2024)	36
FIGURE 13: OPERATIONS DE LA PESEE, AGITATION ET SUSPENSION DE LA SPIRULINE (ORIGINALE, 2024)	36
FIGURE 14 : : EXTRAIT DE LA SPIRULINE	37
FIGURE 15 : DISPOSITIF EXPERIMENTAL (ORIGINALE, 2024).	38
FIGURE 16 : A : PLANTS DE POIVRONS DANS LES ALVEOLES ; B : DISPOSITIF EXPERIMENTAL EN BLOC ; C : PLANT 4-5 FEUILLES ; D : STADE DE FLORAISON ; E : FORMATION DES FRUITS (ORIGINALE, 2024).	38
FIGURE 17 : MESURES DE LA LONGUEUR ET DE LA TAILLE DES FEUILLES (ORIGINAL, 2024). 40	
FIGURE 18 : LONGUEUR DE LA TIGE DE LA VARIETE VENUS 60 « CAPSICUM ANNUUM L. » TRAITEE AVEC DE LA SPIRULINE. LES VALEURS SONT LES MOYENNES DE SIX REPETITIONS ET LES BARRES VERTICALES INDIQUENT LES ECARTS TYPES.	42
FIGURE 19 : TAILLE DE LA FEUILLE DE LA VARIETE VENUS 60 « CAPSICUM ANNUUM L. » TRAITEE AVEC DE LA SPIRULINE. LES VALEURS SONT LES MOYENNES DE SIX REPETITIONS ET LES BARRES VERTICALES INDIQUENT LES ECARTS TYPES.	43
FIGURE 20 : NOMBRE DE FEUILLES PAR PLANT DE LA VARIETE VENUS 60 « CAPSICUM ANNUUM L. » TRAITEE AVEC DE LA SPIRULINE. LES VALEURS SONT LES MOYENNES DE SIX REPETITIONS ET LES BARRES VERTICALES INDIQUENT LES ECARTS TYPES.	44
FIGURE 21 : NOMBRE DE FLEURS PAR PLANT DE LA VARIETE VENUS 60 « CAPSICUM ANNUUM L. » TRAITEE AVEC DE LA SPIRULINE. LES VALEURS SONT LES MOYENNES DE SIX REPETITIONS ET LES BARRES VERTICALES INDIQUENT LES ECARTS TYPES.	45
FIGURE 22 : NOMBRE DE FRUITS PAR PLANT CHEZ LA VARIETE VENUS 60 « CAPSICUM ANNUUM L. TRAITEE AVEC DE LA SPIRULINE. LES VALEURS SONT LES MOYENNES DE SIX REPETITIONS ET LES BARRES VERTICALES INDIQUENT LES ECARTS TYPES.	46
FIGURE 23 : POIDS MOYEN DU FRUIT PAR PLANT CHEZ LA VARIETE VENUS 60 « CAPSICUM ANNUUM L. TRAITEE AVEC DE LA SPIRULINE. LES VALEURS SONT LES MOYENNES DE SIX REPETITIONS ET LES BARRES VERTICALES INDIQUENT LES ECARTS TYPES.	47
FIGURE 24 : RENDEMENT MOYEN DU FRUIT PAR PLANT CHEZ LA VARIETE VENUS 60 « CAPSICUM ANNUUM L. TRAITEE AVEC DE LA SPIRULINE. LES VALEURS SONT LES MOYENNES DE SIX REPETITIONS ET LES BARRES VERTICALES INDIQUENT LES ECARTS TYPES.	48

Listes des abréviations

°C : Celsius

Cm : centimètre

D : dose

G : gramme

FAO : organisation pour l'alimentation et l'agriculture

Ha : hectare

Hcc : capacité au champ

Kg : kilogramme

L : litre

LT : longueur de la tige

M² : mètre carré

Mg : milligramme

ml : millilitre

Mat : matière

P : probabilité

PF : poids frais.

pH : potentiel d'hydrogène

PS : poids sec

S : spiruline

T : tonne

TF : taille de la feuille

W : watt

REMERCIEMENTS

DÉDICACES

RÉSUMÉ

ABSTRACT

ملخص

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

TABLE DES MATÈRES

Table des matières

Chapitre 1. Étude de la culture du poivron.....	1
1.1 Historique.....	1
1.2 Importance économique de la culture du poivron	1
1.3 Dans le monde	1
1.4 En Algérie	2
1.5 Classification	2
1.6 Caractères physiologiques et botaniques.....	3
1.6.1 Système racinaire.....	4
1.6.2 Tige.....	4
1.6.3 Feuilles	4
1.6.4 Fleurs.....	4
1.6.5 Semences	4
1.6.6 Fruits	4
1.7 Exigences climatiques et édaphiques du poivron.....	5
1.7.1 Température	5
1.7.2 Lumière	5
1.7.3 Humidité.....	5
1.7.4 Sol.....	6
1.7.5 Besoins en eau et fertilisation.....	6
1.8 Maladies du poivron	6
1.8.1 Cryptogamiques	6
1.8.2 Bactériennes	7
1.9 Maladies virales	8
Chapitre 2. Physiologie de la spiruline	9
2.1. Caractéristiques physicochimiques de la spiruline	9

2.1.1.	Propriétés physiques.....	9
2.1.2.	Propriétés chimiques	9
2.2.	Composition de la spiruline	10
2.2.1.	Protéines	10
2.2.2.	Lipides	11
2.2.3.	Lipides totaux.....	11
2.2.4.	Acides gras	12
2.2.5.	Glucides.....	13
2.2.6.	Acides nucléiques.....	13
2.2.7.	Vitamines	14
2.3.	Minéraux et oligo-élément	16
2.4.	Autres minéraux.....	18
2.4.1.	Pigments.....	19
3.	Généralité sur les biofertilisants	22
3.1.	Définition	22
3.2.	Type de Bio fertilisant :	22
3.2.1.	Bio fertilisant à base des bactéries solubilisatrices des éléments minéraux :.....	22
3.3.	Spiruline	25
3.3.1.	Historique.....	25
3.3.2.	Taxonomie.....	26
3.3.3.	Morphologie de la spiruline	26
3.3.4.	Reproduction :.....	27
3.3.5.	Distribution géographique dans le monde :	28
3.3.6.	Production mondiale :.....	28
3.4.	Intérêts et domaine d'utilisation	28
3.4.1.	Santé	29
3.4.2.	Produits cosmétiques et agroalimentaires	29
3.4.3.	Domaine animal	29
3.4.4.	Domaine agricole :	29
	Matériel biologique.....	31
2.1.	Matériels utilisés.....	32
2.1.1.	Milieu de culture	32
2.1.2.	Culture de la spiruline	33
2.1.3.	Protocole d'obtention de la spiruline	34
2.1.4.	Étude de caractérisation de la spiruline.....	35

2.2.	Récolte de la spiruline.....	36
2.3.	Préparation de l'extrait de spiruline	36
2.4.	Calcul de la capacité au champ (Hcc).....	37
2.4.1.	Dispositif expérimental	37
2.4.2.	Étapes du travail.....	38
2.4.3.	Apports de la spiruline	39
2.5.	Paramètres morphologiques étudiés.....	39
2.5.1.	Nombre de feuilles.....	39
2.5.2.	Longueur de la tige	40
2.5.3.	Taille de la feuille	40
3.	Troisième partie : Résultats et discussion.....	42
3.1.	Longueur de la tige	42
3.2.	Taille de la feuille	43
3.3.	Nombre de feuilles par plant	44
3.4.	Nombre de fleurs par plant.....	45
3.5.	Nombre de fruits par plant	46
3.6.	Poids moyen du fruit par plant	47
3.7.	Rendement moyen de fruits par plant.....	48
	Discussion.....	50
	Conclusion.....	52
	Références bibliographiques	42

Introduction

Introduction

Depuis le début de l'évolution humaine, l'agriculture et les ressources agricoles ont constitué les principaux moyens de subsistance (Villeneuve, 2020). Actuellement, la majorité de la population mondiale dépend de l'agriculture pour des besoins essentiels tels que l'alimentation humaine, les fourrages pour animaux, ainsi que d'autres ressources nécessaires au maintien d'un mode de vie sain (Altieri, Nicholls et Hérion, 2021). Cependant, les cultures agricoles sont de plus en plus confrontées à des défis environnementaux majeurs, dont la salinité des sols, qui affecte la croissance et le rendement de nombreuses espèces végétales. Parmi ces espèces, le poivron doux (*Capsicum annuum L.*) est particulièrement sensible ou modérément sensible à la salinité (Navarro et al., 2010).

Les réponses des plantes aux stress abiotiques, tels que la salinité, sont complexes et multifactorielles, impliquant des mécanismes d'adaptation et de tolérance qui varient en fonction de l'espèce, de la variété, de la concentration en sel et du stade de développement de la plante (Ben Naceur et al., 2001). Face à ces contraintes, les chercheurs se sont tournés vers des solutions alternatives pour améliorer la résilience des cultures, favorisant ainsi des pratiques agricoles plus durables.

Parallèlement, la tendance mondiale actuelle témoigne d'un retour vers des produits plus naturels et écologiques, visant à minimiser les risques associés à la santé humaine et environnementale (Bernard et Janvier, 2020). Les termes « naturel », « bio » et « bon pour la santé » sont de plus en plus utilisés, non seulement par les médias et l'industrie agroalimentaire, mais aussi dans les discours scientifiques pour promouvoir une approche plus consciente de la relation entre alimentations et santé (Grall, 2020).

Dans ce contexte, la spiruline (*Arthrospira platensis*), une cyanobactérie photosynthétique bien connue, a suscité un intérêt croissant en raison de ses propriétés nutritives et ses applications potentielles comme biostimulant et biofertilisant (Bouzneda, Demane et Meccasi, 2022). Considérée comme une source de composés à haute valeur économique et scientifique, la spiruline est largement étudiée pour ses bénéfices dans l'alimentation humaine et animale. La production et la composition de la biomasse de spiruline sont influencées par plusieurs facteurs environnementaux, notamment la disponibilité en nutriments, la température et l'intensité lumineuse (Laifa, 2022).

Introduction

De nombreuses études ont mis en évidence les avantages des extraits de spiruline dans l'amélioration des performances des cultures, augmentant le rendement et renforçant la résistance des plantes aux stress biotiques et abiotiques (Jean et al., 2015). Dans une perspective de développement d'une agriculture durable et respectueuse de l'environnement, cette étude vise à évaluer l'impact de l'utilisation d'un biofertilisant à base de spiruline sur la culture du poivron doux.

Cette étude se fixe deux objectifs principaux :

1. Étudier la croissance et la production de la spiruline à partir des premières phases de culture, en vue de sa production en tant que biofertilisant.
2. Évaluer l'impact des extraits de spiruline sur la croissance et le rendement de la culture du poivron doux, en particulier face aux contraintes environnementales.

Le mémoire se divise en trois parties principales :

1. Première partie : Étude de la culture du poivron (*Capsicum annuum L.*), avec une attention particulière sur sa sensibilité aux stress abiotiques, notamment la salinité.
2. Deuxième partie : Analyse de la physiologie de la spiruline, y compris les facteurs influençant sa croissance et sa biomasse.
3. Troisième partie : Exploration du rôle des biofertilisants à base de spiruline dans l'amélioration de la croissance et de la résistance des cultures, en mettant l'accent sur les applications potentielles pour une agriculture durable.

Première partie :
étude
bibliographique

Chapitre 1 :
La culture du
poivron

Chapitre 1. Étude de la culture du poivron

1.1 Historique

Le "poivron" est l'appellation française du piment doux à gros fruit. Il vaut mieux employer le terme "piment" qui lui englobe à la fois les piments à fruits doux et les piments à fruits petits et à saveur plus ou moins brûlante. Le piment appartient à la grande famille d'origine tropicale des Solanacées qui comprend également la tomate, la pomme de terre, le tabac (Bechar et al., 2020a).

Le piment (*Capsicum annuum*), est l'espèce la plus importante sur le plan économique et sa culture s'est développée en premier dans la zone centrale du continent sud-américain qui correspond à la Bolivie actuelle : il s'agit d'une zone de transition entre le climat tempéré et le climat subtropical (Bechar et al., 2020b). Il fut introduit en Europe à la fin du 15^e siècle et au début du 16^e siècle par les Conquistadors (**Roux 2018**). Avec l'évolution des grandes voies commerciales entre les divers continents, le poivron s'est diffusé dans le monde entier, de l'Afrique à l'Océanie et à l'Asie, considéré comme le second centre de diffusion (**Tessier 2004**).

1.2 Importance économique de la culture du poivron

À cause de l'importance de la culture du poivron avec ses variétés et couleurs et son rôle dans les industries alimentaires de transformation. Plusieurs pays ont investi dans ce domaine. Des millions de tonnes sont produites chaque année avec un rendement parfois élevé dans chaque mètre cube (Bechar et al., 2020a).

1.3 Dans le monde

Environ 24 millions de tonnes de poivron frais sont produites dans le monde dont près de la moitié en Asie ; ils sont également cultivés en Amérique du Nord et Centrale (Tableau 01). Alors que l'Afrique est dominante pour la production de piments piquants, dont le Nigeria est le premier producteur (**Chaléard 1996**).

Au niveau mondial, c'est la première fois de l'histoire que la production de poivron dépasse les 34 millions de tonnes. Selon les données de l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (**FAO, 2016**), le record de production mondiale de poivron a été atteint en 2016 avec 34 497 460 T. Au total, dans le monde, 1 938 788 ha sont consacrés à cette culture ce qui induit un rendement de 1,78 kg/m². Pour l'Espagne, une forte productivité de 6,07 kg/m² pour l'Espagne, qui a le 2^e meilleur rendement, et 4,28 kg/m² pour le Maroc qui est en 6^e position en matière de rendement.

Tableau 1: Classement des pays producteurs du poivron dans le monde (FAO, 2016)

Pays producteurs	Production (Tonnes)	Rendement (kg/m ²)
Chine	17 435 000	2,32
Mexique	2 737 000	1,61
Turquie	2 457 820	2,76
Indonésie	1 961 000	0,75
Espagne	1 082 690	6,07

1.4 En Algérie

En Algérie, la superficie et le rendement du poivron sous serre ont évoluées surtout à partir de 2006. Huit ans, le rendement à passer de 130560.79 (Tonnes/Ha) en 2006 à 215504.29 (Tonnes/Ha) en 2013 avec une surface de 22388 Ha (tableau 2) (FAO, 2016).

Tableau 2: Superficies et rendements du poivron sous serre en Algérie (2006-2013) (FAO, 2015).

Année	Surface (Ha)	Rendement (Tonnes/Ha)
2006	21131	130560.79
2007	20663	129727.05
2008	20403	137429.30
2009	21417	148923.29
2010	21688	175402.07
2011	21272	180644.51
2012	22605	188704.27
2013	22388	215504.29

1.5 Classification

Arthur John Cronquist est connu pour avoir été le principal responsable de la classification de Cronquist, une classification classique des plantes à fleurs, en 1968 et. La taxonomie du poivron (*Capsicum annuum*) est la suivante :

Règne : Plantae

Division : Magnoliophyta

Classe : Magnoliopsida

Ordre: Solanales

Famille : Solanaceae

Genre : Capsicum

Espèce : *Capsicum annuum* ; Linnaean (1753)

1.6 Caractères physiologiques et botaniques

La plante de poivron se cultive dans nos climats comme une plante herbacée annuelle bien qu'elle puisse repousser et produire plusieurs années dans les zones tropicales. Comparativement à la tomate, le poivron est exigeant sur les plans agronomique et climatique, bien que certains types à petits fruits soient très rustiques et s'adaptent aux conditions plus extrêmes (Son 2018).

Le poivron est plus sensible à l'humidité du sol que la tomate et moins tolérant à la salinité. Le poivron préfère des sols profonds, riches en matière organique, bien aérés, perméables et irrigables. Il n'est pas particulièrement sensible à l'acidité du sol et s'adapte bien aux pH compris entre 5,6 et 7,8. La figure 1 représente la plante du poivron dans un abri serre dans le stade de floraison et fructification (Ben Micia et al. 2006).



Figure 1 : Vue générale de la plante du poivron dans une Abri-serre

1.6.1 Système racinaire

Le système racinaire du poivron est pivotant. Les racines robustes ont tendance à se développer latéralement dans un rayon allant jusqu'à 0.50 m (BECHAR, SADOU, et SADOK 2020a).

1.6.2 Tige

Elle est herbacée en haut, suivant les variétés et les conditions de culture, la croissance peut être déterminée ou indéterminée ; La plante atteint plus de 50 cm de haut en général (Nyabyenda 2005).

1.6.3 Feuilles

Les feuilles lancéolées de couleur verte, brillante, se terminant en pointe, sont d'un vert brillant. Ce caractère est fortement lié à la variété. Ils existent une corrélation entre la taille des fruits et celle des feuilles. Ainsi les variétés à gros fruits portent normalement de grandes feuilles, longues et vice versa pour les fruits de petite taille (Brieu 2022).

1.6.4 Fleurs

Les fleurs, nombreuses et petites, sont blanches, à pétales soudés et pointus, au nombre de 6 à 8. La grandeur de la fleur est l'un des critères de distinction des variétés (BECHAR, SADOU, et SADOK 2020b).

1.6.5 Semences

Elles sont réniformes, plates et de couleur jaune pâle. Un gramme compte environ entre 140 et 150 graines. Leur viabilité, c'est-à-dire leur faculté germinative peut être préservée à 50% de pendant 3 ans, lorsqu'elles sont maintenues dans des conditions de faible humidité et de température et à l'abri de la lumière (BECHAR, SADOU, et SADOK 2020c).

1.6.6 Fruits

Les fruits sont sous forme de baies dont la forme, couleur, et grosseur change avec la maturation et suivant les variétés du poivron, on peut trouver 3 couleurs distinctes : vert, jaune et rouge, volumineux ou peu volumineux (Tigha et Kisserli 2021). La figure 2 montre les différents constituants du poivron.



Figure 2 : Constituants du poivron (feuille, fleur, fruit et tige d'un poivron

Le poivron « *Capsicum annuum* L. » est une solanée annuelle. Le cycle végétatif dépend des variétés, des températures aux différents stades végétatifs (germination, floraison, et maturation) et de l'intensité lumineuse (BECHAR et al. 2020b).

Grâce à la durée de vie du poivron (surtout dans la serre), la première période de croissance est la plus sensible aux maladies, ainsi que pour les ravageurs, parce que les feuilles de la plante sont sensibles aux différents facteurs pathogènes (BECHAR et al. 2020b).

1.7 Exigences climatiques et édaphiques du poivron

1.7.1 Température

Le poivron est l'une des plantes maraichères les plus exigeantes en températures, mais moins exigeantes en ensoleillement que la tomate (Bechar et al. 2020c). Une température nocturne journalière de 24 °C est suffisante pour un développement convenable ; pendant la nuit, la température diurne doit être aux environs de 17 °C. En dessous de 10 °C elle est arrêtée. Les températures supérieures à 35 °C réduisent et perturbent la fructification et la photosynthèse (Mohamed 2020).

1.7.2 Lumière

Selon Pochard (1982), le poivron nécessite une très grande intensité de lumière pendant toute la végétation surtout pendant l'induction florale.

1.7.3 Humidité

De préférence, la culture du poivron est faite dans les régions et humide. L'humidité de l'air doit être comprise entre 60% et 70%. L'humidité faible même de courte durée entraîne une couleur excessive des fleurs, et des accidents physiologiques sur le fruit. Le développement des fruits ne s'effectue pas en présence d'une humidité basse et d'une température élevée. (Bechar et al. 2020c).

1.7.4 Sol

À cause de son système racinaire, le poivron demande des sols profonds bien drainés (**Hamraoui 2022**). D'autres comme Williams et al., (1991) estiment que l'espèce *Capsicum annuum* peut avoir une bonne croissance dans les sols sableuse. Par ailleurs, la culture du poivron fatigue rapidement le sol, elle est très exigeante en rotation de culture. 5.5 pH pour avoir une bonne croissance et rendement du poivron, Le pH du sol doit être compris entre 5.5 et 7, c'est à peu le même domaine conseillé dans les cultures hors sol. L'irrigation dans les sols sableux est favorable à cette culture (**Bechar et al. 2020**).

1.7.5 Besoins en eau et fertilisation

La culture du poivron nécessite des arrosages réguliers. Les besoins de la culture se situent aux environs de 40 cm pendant la période végétative et de 20 à 40 cm pendant la période de cueillettes de fruits, soit 60 à 80 cm/cycle (**Bechar et al. 2020**). La fumure de fond recommandée dans la plupart des sols à richesse moyenne est un fumier décomposé de 40-50 T/ha (N : 100 kg/ha ; P : 150 kg/ha et K : 120-150 kg/ha). Selon (**Ibbari et Kaced 2020**), le poivron donne de bons résultats en présence d'un fumier bien décomposé. La fertilisation minérale est fractionnée en trois parties. Pendant le stade végétatif, pendant la floraison et enfin à la fructification.




1.8 Maladies du poivron

Les poivrons verts ou de couleur peuvent être infectés par des maladies ou infestés par des parasites pendant toute la période de culture. Des traitements bio et de bonnes façons culturales en limiteront l'impact (**Ait Issad 2020**). Parmi ces maladies on cite trois types (Cryptogamiques, bactériennes et virales) selon les 3 tableaux en dessous

1.8.1 Cryptogamiques


Le sol est habité de façon permanente par de nombreux organismes. Pour les cultures maraichères, on rencontre plusieurs types de champignons responsables de maladies cryptogamiques (Tableau 4).



Tableau 3 : Quelques maladies cryptogamiques du poivron (ONTARIO, 2009)

 <p>Mildiou</p>	<p><i>Phytophthora capsici</i></p>	<p>Nécrose brune bien délimitée au niveau du collet. Flétrissement brutal des plantes</p>
 <p>Oïdium</p>	<p><i>Liveilla taurica</i></p>	<p>Taches jaunâtres sur les feuilles, parfois couvertes d'un feutrage blanc</p>
 <p>Alternariose</p>	<p><i>Alternaria solani</i></p>	<p>Taches noires de taille variable, plus au moins arrondie et touches ovales sur les tiges</p>

1.8.2 Bactériennes

Tableau 4 : Quelques maladies bactériennes du poivron (ONTARIO, 2009)




Maladies	Agent responsable	Nature des dégâts
<p>Flétrissement bactérien</p> 	<p><i>Pseudomonas solanacearum</i></p>	<p>Flétrissement irréversible d'abord puis généralisé. Brunissement des vaisseaux et tissus contigus</p>

Gale bactérienne 	Xanthomonas visicatoria	Apparition de petites taches noires sur les sépales, ces taches s'élargissent avec le temps
Le chancre bactérien 	Corynebacterium michiganense	Flétrissement du fruit accompagné de chancres longitudinaux sur les tiges

1.9 Maladies virales

Selon **Ryckebusch** (2020), 40% des maladies à virus sont transmises par les insectes, dont le groupe le plus redoutable est celui des pucerons. La transmission se fait lors des piqûres de prise de nourriture.

Tableau 4 : Exemples de maladies virales du poivron (ONTARIO, 2009)

Maladies	Agent responsable	Nature des dégâts
Mosaïque du Concombre 	Virus de la Mosaïque du concombre (CMV)	Mosaïque en taches annulaires, en arabesque et marbrure
Mosaïque de la Luzerne 	Virus de la Mosaïque de la Luzerne (AIMV)	Production d'un nouveau feuillage et une forte mosaïque blanche et jaune
Mosaïque de la Pomme de terre 	Virus Y de la pomme de terre (PVY)	Mosaïque vert brillant parfois nécroses des nervures

Chapitre 2 : physiologie de la spiruline

Chapitre 2. Physiologie de la spiruline

2.1. Caractéristiques physicochimiques de la spiruline

2.1.1. Propriétés physiques

Pour se développer, la Spiruline a besoin d'éléments minéraux simples tels que l'eau, les sels minéraux, le CO₂ et l'O₂ qu'elle puise directement dans son milieu tout en utilisant la lumière solaire comme source d'énergie grâce à son système pigmentaire (**Charpy, Langlade, et Alliod 2008**). Ce mode de synthèse de biomasse est la photo autotrophie.

La Spiruline croît dans des milieux naturels caractérisés par des eaux saumâtres, chaudes, alcalines (8 < pH < 11,5) et natronées (fortement concentrées en carbonates et bicarbonates) de la zone intertropicale (**Bensehaila 2016**). En règle générale les phosphates, les carbonates, les nitrates et le fer, sont les éléments limitants de la production phytoplanctonique dans les milieux aquatiques. Dans les gisements naturels, ces éléments sont apportés par les bassins versants (**Oertli et Frossard 2013**).

La Spiruline se développe dans des eaux chaudes (28 à 40°C) et bénéficiant d'une intensité lumineuse élevée. Le vent joue un rôle important en créant une agitation qui favorise une dispersion homogène de la Spiruline dans le milieu, et donc son exposition à la lumière (**Charpy, Langlade, et Alliod 2008**). En milieu naturel, lorsque les conditions sont optimales, les Spirulines peuvent se développer en grande quantité et entrent alors en compétition avec d'autres organismes. Lors des efflorescences, la consommation des carbonates et bicarbonates entraîne une augmentation du pH limitant ainsi la croissance des autres microorganismes (**Becerra-Celis 2009**).

2.1.2. Propriétés chimiques

La composition de la Spiruline dépend des éléments chimiques dont elle dispose dans le milieu. Ainsi, en milieu naturel, dans la région du Kanem (Tchad), la Spiruline récoltée n'est pas de qualité égale d'une région à l'autre. En milieu cultivé, il est possible de jouer sur les intrants et d'influer sur sa composition. La culture en bassin permet en tous les cas de maîtriser la qualité (**Charpy, Langlade, et Alliod 2008**).

La plupart des études des constituants de la Spiruline ont été réalisées sur *Spirulina platensis* (connu aussi sous l'appellation de *Arthrospira platensis* ou *S. geitler*). Cette espèce sert de référence, car sa composition est relativement constante même si elle varie selon la souche, les conditions de culture et le mode de conditionnement (**Charpy, Langlade, et Alliod 2008**). Nous avons associé les potentiels thérapeutiques et nutritionnels aux composants de la

Spiruline en nous basant sur des articles scientifiques, qui pour la plupart concernent des études sur les animaux et sur des tissus humains in vitro (**Charpy, Langlade, et Alliod 2008**).

Nous gardons à l'esprit que l'expérimentation d'une molécule au laboratoire ou sur des animaux ne permet pas de prévoir complètement ses effets chez l'homme. Beaucoup d'articles concernant les effets thérapeutiques sont basés sur l'ingestion de Spiruline ou le traitement par des extraits du milieu de culture. Il est dans ce cas difficile de savoir quelles sont là où les molécules qui agissent ou interagissent (**Charpy, Langlade, et Alliod 2008**).

2.2.Composition de la spiruline

La spiruline est utilisée en alimentation humaine, compte tenu de ses teneurs en Protéines, vitamines, minéraux et acides gras non saturés. C'est l'ensemble de tous ses nombreux facteurs nutritifs qui ont n'en fait un aliment si précieux. La composition chimique des spirulines est variable selon les conditions de culture (**Mollo et Noury 2013**).

2.2.1. Protéines

La teneur en protéines de la Spiruline est élevée. Elle représente 10 à 11% de la masse humide, soit 60 à 70% de sa matière sèche (**Clément, 1975 ; Fox 1999**). Ce pourcentage est bien plus élevé que celui du poisson (25%), du soja (35%), de la poudre de lait (35%) et des céréales (14%) (**Charpy, Langlade, et Alliod 2008**).

La Spiruline est très riche en matières azotées et en contient deux fois plus que le soja, trois fois plus que la viande ou le poisson. Cette richesse est cependant à relativiser compte tenu de la faible quantité de Spiruline utilisée en complément alimentaire (<10g par jour). Ce micro-organisme ne possède pas de paroi cellulosique, mais une enveloppe relativement fragile, constituée de polysaccharides. Cette faible teneur en cellulose explique sa digestibilité de l'ordre de 75 à 83% (**Bensehaila 2016**).

De ce fait, la Spiruline ne nécessite pas de cuisson ni même l'administration d'un traitement spécial pour une bonne digestibilité protéique. Lorsque l'on regarde le spectre des acides aminés présents, on retrouve tous les acides aminés essentiels qui représentent un poids de 41% par rapport au poids total de tous les acides aminés présents (**Menal, Taders, et Chergui 2021**).

On peut donc dire que les protéines de la spiruline sont complètes. Si l'on regarde plus en détail les acides aminés, on remarque que :

méthionine et la cystéine, acides aminés soufrés (**Saint Eve et al. s. d.**) sont assez faiblement représentés dans l'aminogramme (à 80% de la valeur conseillée par la FAO). La

référence étant celle l'albumine de l'œuf et la caséine (Pilette et al. 2003). Il sera donc judicieux de compléter l'apport en spiruline par des aliments riches en ces deux aminoacides : riz, millet, blé avec des lentilles, pois chiches par exemple (Gallier 2020). Ce qui permettra dans le même temps d'optimiser la valeur biologique de la spiruline déjà assez élevée.

La présence d'acides aminés précurseurs de neurotransmetteurs dont en particulier le tryptophane, précurseur d'indolines : la sérotonine et la mélatonine, la tyrosine, précurseur des catécholamines : la dopamine et la noradrénaline et le glutamate, excitateur et précurseur du gamma ammino butyrate (GABA).

Tableau 5 : Pourcentage moyen des acides aminés de Spirulina plantensis (Browitzka, 1988).

Acides aminés Essentiels (%)	Jacquet 1974	Clément 1975	Fox 1999	Borowitzka
Soleucine	5.60	6.40	5.98	5.70
Leucine	8.00	9.00	8.71	8.70
Lysine	4.20	4.50	5.25	5.10
Méthionine	2.25	2.60	2.85	2.60
Phénylalanine	4.40	4.60	5.09	5.00
Thréonine	4.70	5.50	5.58	5.40
Valine	5.70	6.90	7.72	7.50
Tryptophane	1.00	1.60	1.48	1.60
Acides aminés Non essentiels (%)	Jacquet 1974	Clément 1975b	Fox 1999	Borowitzka
Alanine	7.25	7.90	8.24	7.90
Arginine	6.60	6.70	7.92	7.60
Acide aspartique	9.30	9.20	9.50	9.10
Cystéine	0.95	0.90	0.93	0.90
Acide glutamique	NC	12.90	13.2	12.70
Glycine	4.80	5.00	5.07	4.80
Histidine	1.60	1.60	1.50	1.50
Proline	3.60	1.90	4.32	4.10
Sérine	5.00	5.60	5.46	5.30
Tyrosine	4.30	4.90	NC	4.60

2.2.2. Lipides

2.2.3. Lipides totaux

Bien que plusieurs publications ont donné une valeur de 5.6 à 7% du poids sec en lipides totaux, de meilleurs systèmes d'extraction permettent d'obtenir des valeurs situées entre 6 et 13% (Bousbia, 2011)

Ces lipides totaux peuvent être séparés en une fraction saponifiable (83%) et une fraction insaponifiable (17%), contenant essentiellement des paraffines, des pigments, des alcools terpéniques et des stérols (**Ramirez 2013**).

2.2.4. Acides gras

On range actuellement les acides gras essentiels en deux groupes (oméga-3 et oméga-6) caractérisés par la position de l'insaturation la plus proche du groupe méthyl terminal (**Claude 2013**). Comme les acides oméga-3 et oméga-6 sont convertis chez l'homme en dérivés biochimiques distincts qui semblent avoir des effets antagonistes (**Giraudeau 1993**), certains spécialistes recommandent actuellement un rapport oméga-6/oméga-3 situé entre 4 et 5. Pour une analyse détaillée des acides gras de la spiruline, on se rapportera à Hudson et Ka ; les glycolipides de la spiruline ont aussi été étudiés en détail (**Akretche et Mokrani 2020**).

L'extraction par le gaz carbonique supercritique des lipides de la spiruline, et particulièrement de l'acide linoléique semble la méthode de choix pour une extraction quantitative (**Falquet et Hurni 1986**).

Les acides gras oméga-3 et oméga-6 de la Spiruline préviendraient l'accumulation de cholestérol dans l'organisme. Ceci pourrait expliquer en partie la diminution des taux en cholestérol et triglycérides (**Azizi et al. 2022**).

La Spiruline figurerait parmi les meilleures sources connues d'acide gamma-linoléique, avec le lait humain, et quelques huiles végétales peu connues (huile d'onagre, de bourrache, de pépin de cassis et de chanvre) (**Kanehisa et al. 2023**).

La présence d'acide gamma-linoléique est à souligner du fait de sa rareté dans les aliments courants et que c'est un précurseur de médiateurs chimiques des réactions inflammatoires et immunitaires (**Falquet et Hurni 1986**).

Tableau 6 : Composition typique en pourcentage des principaux acides gras de 3 espèces de Spiruline d'après (**Pascaud et al., 1993**).

Acides gras	S. pacifica	S. maxima	S. plantensis
almitique (16 :0)	44.2	63.0	25.8
Palmétoléique(16 :1) Oméga-6	4.4	2.0	3.8
Stéarique (18 :0)	Traces	1.0	1.7

Oléique (18 :1) oméga-6	0.4	4.0	16.6
Linoléique (18 :2) Oméga-6	24.3	13.0	40.1
Gamma-linoléique (18 :3) oméga-6	22.1	13.0	40.1
Alpha-linoléique (18 :3) oméga-3	Traces	Traces	Traces

2.2.5. Glucides

Les glucides constituent globalement 15 à 25% de la matière sèche des spiruline (**Falquet et Hurni 1986**). L'essentiel des glucides assimilables est constitué de polymères tels que des glucosanes aminées (1.9% du poids sec) et des rhamnosannes aminés (9.7%) ou encore de glycogène (0.5%). Les glucides simples ne sont présents qu'en très faibles quantités ce sont le glucose, le fructose et le saccharose ; on trouve aussi des polyols comme le glycérol, le mannitol et le sorbitol (**Falquet et Hurni 1986**). Les parois cellulaires des spirulines s'apparentent à celles des bactéries Gram positifs puisqu'elles sont formées de glucosamines et d'acide muramique associés à des peptides. Bien que non digestibles, ces parois sont relativement fragiles et rendent le contenu cellulaire très accessible aux enzymes de digestion : c'est là un avantage important par rapport aux organismes pourvus de parois cellulosesiques (levures, chlorelles...) (**Falquet et Hurni 1986**).

Du point de vue nutritionnel, la seule substance glucidique intéressante par sa quantité chez la spiruline est le méso-inositol phosphate qui constitue une excellente source de phosphore organique ainsi que d'inositol (350-850 mg/kg mat. Sèche (**Falquet et Hurni 1986**).

2.2.6. Acides nucléiques

La teneur en acides nucléiques (ADN et ARN) est un point nutritionnel important, car la dégradation biochimique d'une partie de leurs composants (les purines : adénine et guanine) produit en dernier lieu de l'acide urique (**Falquet et Hurni 1986**).

Or une élévation du taux d'acide urique plasmatique peut produire à la longue des calculs rénaux et des crises de goutte. On admet généralement que la dose maximum admissible à long terme d'acide nucléique se situe aux alentours de quatre grammes par jour, pour un adulte (**Falquet et Hurni 1986**).

Il faut ajouter que l'ARN produit deux fois plus d'acide urique que l'ADN, pour une même teneur en purines et que l'élévation du taux d'acide urique dépend aussi de multiples facteurs, tels que l'âge, le sexe ou encore l'obésité. Chez *S. Platensis* comme chez *S. Maxima*, on rapporte des valeurs de 4.2 à 6% d'acides nucléiques totaux dans la matière sèche (**Falquet et Hurni 1986**).

La proportion d'ADN serait d'un quart à un tiers par rapport à l'ARN (15). Ces chiffres sont à mettre en rapport avec d'autres aliments (tableau 8). La teneur en acides nucléiques des spirulines est très inférieure à celle de la généralité des unicellulaires.

Tableau 7 : Teneur en acides nucléiques de quelques aliments (Falquet et Hurni 1986).

Aliments	Acides nucléiques totaux (% mat. Sèche)
Viande de bœuf	1.5
Foie de bœuf	2.2
Spiruline	4-6
Levure	23

En se basant sur une valeur moyenne de 5% en acides nucléiques, la limite quotidienne de 4 grammes d'acides nucléiques représente le contenu de 80 grammes de spiruline sèche (Falquet and Hurni, 2006). Cette quantité équivaut à environ huit fois la dose de spiruline recommandée comme supplément alimentaire. On peut donc raisonnablement penser que la teneur en acides nucléiques de la spiruline ne pose pas de problèmes, même à long terme et pour des doses élevées (Falquet et Hurni 1986).

2.2.7. Vitamines

- **Provitamine A (β -carotène) :** Le β -carotène représente 40 à 80% des caroténoïdes présents dans la spiruline, le reste étant composé principalement (par ordre décroissant) de xanthophylle, de cryptoxanthine, d'échinénone, de zéaxanthine et de lutéine (Falquet et Hurni 1986).

On trouve entre 700 et 2000 mg de beta-carotène et environ 100 à 600 mg de cryptoxanthine par kilo de spiruline sèche, ces deux caroténoïdes sont convertibles en vitamine A par les mammifères (Falquet et Hurni 1986).

Quelques grammes de spiruline suffisent donc à couvrir entièrement les besoins en vitamine A d'un adulte. D'autre part, l'absence de rétinol (vitamine A libre) exclut un éventuel risque de surdosage, le β -carotène n'étant pas toxique par accumulation au contraire de la vitamine A (Falquet et Hurni 1986).

La biodisponibilité des caroténoïdes de la spiruline a été démontrée aussi bien chez le rat que chez la poule. Cette biodisponibilité a aussi été démontrée chez l'homme (Falquet et Hurni 1986).

Des études cliniques ont également prouvé l'excellente utilisation des caroténoïdes de la spiruline chez l'humain. De plus, une étude portant sur 5000 enfants indiens d'âge préscolaire a montré la surprenante efficacité d'une dose quotidienne unique d'un gramme de spiruline sur la déficience chronique en vitamine A (**Falquet et Hurni 1986**).

Après 5 mois, la proportion d'enfants gravement déficients en vitamine A, c'est-à-dire présentant le symptôme de la "tache de Bitot" sur la conjonctive de l'œil, est passée de 80% à 10% (**Organization 1976**).

Cette étude semble bien démontrer que de très faibles doses de spiruline suffisent déjà à réduire considérablement les risques de cécité et d'atteintes neurologiques consécutives à la déficience en vitamine A chez l'enfant (**Falquet et Hurni 1986**).

Une étude en cours, soutenue par la fondation Nestlé, vise à déterminer précisément le devenir des caroténoïdes de la spiruline consommée par l'homme cette étude faite appel à de la spiruline cultivée dans de l'eau lourde (D2O) afin d'en marquer isotopiquement les caroténoïdes : il devient ainsi possible de suivre le cheminement métabolique de ces constituants de la spiruline (**Falquet et Hurni 1986**).

- **Vitamine E (tocophérols) :** On trouve 50 à 190 mg de vitamine E par kilo de spiruline sèche. Teneur comparable à celle des germes de blé. Une publication plus récente et faisant appel à de meilleures techniques analytiques n'a trouvé que 13 mg/kg de tocophérol (**Falquet et Hurni 1986**).
- **Vitamines hydrosolubles :** Bien que moins riche que la levure en vitamines du groupe B (B12 excepté), la spiruline constitue pourtant une bonne source de ces cofacteurs (**Falquet et Hurni 1986**).

Tableau 8 : Teneur en vitamines en µg/g de matière sèche de Spiruline (**Falquet et Hurni 1986**).

Vitamine	Teneur (mg/kg)	Besoin/Jour (adulte) (24-25)
B1	34-50	1.5 mg
B2	30-46	1.8 mg
B6	5-8	2.0 mg
B12	0.10-0.34*	0.003 mg
Niacine	130	20 mg
Folate	0.5	0.4 mg
Panthoténate	4.6-25	6-10 mg

Biotine	0.05	0.1-0.3 mg
C	Traces	15-30 mg

- **Vitamine B2** : La spiruline est un apport non négligeable de vitamine B2 puisqu'elle en apporte environ, pour une dose journalière, 30%. La vitamine B2 intervient dans de nombreux processus (**Nor Elhouda 2022**). Elle a est un rôle protecteur contre l'oxydation. Elle intervient dans le cycle du glutathion, dans les maladies cardiovasculaires (homocystéine), dans le métabolisme des sucres, des lipides et des protides notamment, mais également dans le déclin des fonctions cognitives. Synthétisée en partie par le foie, elle se retrouve principalement dans les feuilles des végétaux chlorophylliens, mais aussi dans les céréales, le poisson, la viande, les fruits, etc. (**Hanane 2020**).
- **Vitamine B12** : La vitamine B12 se retrouve uniquement dans les produits animaliers. Ce qui amène bien souvent des carences aux personnes suivant des régimes alimentaires stricts tel que les végétariens (**Vittoriani et Laetitia 2021**). La spiruline représente une source très intéressante de vitamine B12, puisqu'elle apporte la quantité recommandée par jour (**Touhari 2021**).
- **Bioptérine** : Spiruline contient une grande quantité de bioptérine (plus précisément l'alpha- glucoside de la bioptérine, qui semble jouer un rôle fondamental dans la protection de l'appareil photosynthétique contre les rayons UV (**Falquet et Hurni 1986**). Cette substance fortement fluorescente peut, chez l'homme, être convertie en un co-facteur enzymatique d'une très grande importance, la tétrahydrobioptérine (**Falquet et Hurni 1986**). On ne peut considérer cette substance comme une vitamine, car elle peut être entièrement synthétisée chez l'humain ; il existe toutefois des situations pathologiques liées à un manque de synthèse (**Stevens, Lowe, et Young 2004**). Situation qui peut être améliorée par un apport externe de tétrahydrobioptérine (**El Fadili 2002**). L'efficacité de la bioptérine elle-même, par voie orale, n'est pas connue à ce jour.

2.3.Minéraux et oligo-élément

Les minéraux spécialement intéressants chez la spiruline sont le fer, le zinc, le magnésium, le calcium, le phosphore et le potassium (**Jourdan 2006**).

* **Fer** : La très haute teneur en fer de la spiruline cultivée (550-6000 mg/kg) est à souligner doublement du fait que les carences en fer sont très répandues (anémies ferriprives), surtout chez les femmes et les enfants et que les bonnes sources alimentaires de fer sont rare (**Touhami et Abdelmalek SDA**).

Par comparaison les céréales complètes, classées parmi les meilleures sources de fer, n'en contiennent que 150 à 250 mg/kg ; de plus le fer d'origine végétale ne présente qu'une très faible biodisponibilité, seul environ 5% de ce fer est réellement absorbable, à cause de la présence de facteurs anti-nutritionnels (comme les phytates et les tanins) qui empêchent la métabolisation du fer (**Baadi et Menadi SDA**).

Quant aux suppléments de fer donnés sous forme de sulfate ferreux, ils peuvent poser des problèmes de toxicité, probablement à cause de leur effet prooxydant et sont souvent responsables de diarrhées ou d'autres signes d'intolérance. Dans le cas de la spiruline, la biodisponibilité élevée du fer a été démontrée tant chez le rat (**Falquet et Hurni 1986**).

Cette dernière étude démontre que le fer de la spiruline est mieux absorbé que celui de la viande, ce qui est exceptionnel pour un fer non héminique. Selon les mêmes travaux, le taux de formation de ferritine après digestion de spiruline serait plus de six fois plus élevé que dans le cas d'une même quantité de fer apporté par digestion de viande (**Falquet et Hurni 1986**).

Zinc : La spiruline cultivée sans apport intentionnel de zinc au milieu de culture n'en contient généralement que des traces (21-40 microg/g), alors qu'on peut en trouver dans certaines spirulines naturelles près de 400 microg/g (**Falquet et Hurni 1986**).

Ces valeurs sont insuffisantes pour que ces spirulines puissent être considérées comme de bonne source de zinc, car les apports journaliers recommandés (AJR) sont de 0.6 à 3 mg/j chez un nourrisson/enfant (ces variations dépendent du type de régime alimentaire associé), de 4 à 12 mg/j pour un adolescent et de 3 à 8 mg/j chez l'adulte (**Falquet et Hurni 1986**). La spiruline peut toutefois très facilement être enrichie en zinc (**Menal et al. 2021**).

- **Magnésium** : La spiruline peut être considérée comme une excellente source alimentaire de magnésium (**Touhari 2021**): elle en est naturellement riche, entre autres par sa teneur en chlorophylle³, et ce magnésium a été démontré biodisponible pour l'homme. Il faut souligner que la carence en magnésium tend aussi à entraîner une carence en potassium, ce dernier n'étant alors plus absorbé par l'organisme. La spiruline qui est à la fois riche en magnésium et en potassium semble, là encore, parfaitement indiquée dans les formules de renutrition (**Touhari 2021**).

- **Sélénium** : Sélénium est un microélément essentiel qui intervient dans la protection contre les espèces oxygénées réactives (**Elheme, Rouimel, et Ouanas 2021**). Des essais de supplémentation menés sur des rats artificiellement carencés en sélénium ont abouti à la conclusion que la spiruline enrichie en cet élément était une excellente source de sélénium (**Arbaoui et Aridj 2022**).
- **Iode** : On trouve des données indiquant la possibilité d'obtenir par sélection/adaptation des souches de spiruline capables de fixer de l'iode ces travaux manquent toutefois de clarté et les teneurs en iode annoncées semblent sujettes à caution. Comme les sels d'iode sont chers et que la spiruline ne semble pas, en conditions normales, concentrer activement cet élément, il est à craindre que l'enrichissement des milieux de culture n'aboutisse à un fort gaspillage (**Falquet et Hurni 1986**).

2.4. Autres minéraux

Tout comme le zinc a mis longtemps à apparaître dans toute son importance en matière de lutte contre la malnutrition, gageons qu'une série d'autres micronutriments arriveront à leur tour sous les feux de l'actualité (tableau 10). Le cuivre, par exemple, semble bien devoir être absorbé en quantité proportionnelle aux apports de zinc, sous peine de troubles cardiaques (**Falquet et Hurni 1986**).

L'utilisation de spiruline comme véritable échangeur d'ions dans divers travaux portant sur la dépollution laisse penser que la plupart des éléments capables de former des cations (et plus encore des polycations) pourraient faire, si nécessaire, l'objet d'enrichissement dans la spiruline. L'arrivée sur le marché de « super-spirulines » enrichies en fer, en zinc, en magnésium ou en sélénium montre bien le potentiel de cette démarche : S'y ajouteront certainement des spirulines enrichies en cuivre, en chrome, en manganèse... ou en une véritable palette de microéléments (**Falquet et Hurni 1986**).

Calcium, phosphore et magnésium sont présents dans la spiruline en quantités comparables à celles trouvées dans le lait. Les quantités relatives de ces éléments sont équilibrées ce qui exclut le risque de décalcification par excès de phosphore. Une haute teneur en potassium est également à souligner, car dans le cadre des pays industrialisés, bien des nutritionnistes s'élèvent contre les trop faibles rapports potassium/sodium de la grande majorité des aliments disponibles (**Falquet et Hurni 1986**).

Tableau 9: analyse typique des minéraux dans la spiruline (mg/kg) (**Falquet et Hurni 1986**).

Minéraux	Teneur de la spiruline (Mg/kg)	Doses requises (mg/jour) *
----------	--------------------------------	----------------------------

Calcium	1300-14000	1200
Phosphore	6700-9000	1000
Magnésium	2000-4000	250-350
Fer	600-6000**	18
Zinc	21-6000**	15
Cuivre	8-2000**	1.5-3
Chrome	2.8	0.5-2
Manganèse	25-37	5
Sodium	4500	500
Potassium	6400-15400	3500
Sélénium	0.01-50**	0.05

- Pour l'adulte (NCR,1980) *.
- Valeurs obtenues par enrichissements spécifiques*

2.4.1. Pigments

- **La phycocyanine** : Elle est constituée d'une structure protéique reliée à un chromophore. C'est un pigment assez rare dans la nature qui absorbe la lumière dans une longueur de 61 à 650 nanomètres (**Benmalek et Touahir SDA**). Elle est représentée à environ à hauteur de 10 à 11% en moyenne dans la spiruline. Appréciee comme colorant bleu naturel dans l'industrie agroalimentaire, de nombreuses recherches sont en cours pour connaître toutes ses propriétés (**Benmalek et Touahir SDA**). Sa structure particulière lui confère des propriétés antioxydantes, antiradicalaires et détoxifiantes (**Chahrazed, Ramlia Belkis, et Chaima 2022**). La phycocyanine stimulerait également la production des globules rouges et des globules blancs(Schepens 2020).
- **Chlorophylle** : Elle est un pigment essentiel de la photosynthèse puisqu'elle transforme l'énergie lumineuse en énergie chimique. Elle est constituée d'un atome de magnésium en son centre, la chlorophylle est parfois comparée à l'hémoglobine qui possède quant à elle un atome de fer. La spiruline en contient environ 1%, ce qui stimulerait les fonctions de presque tous les organes (**Benmalek et Touahir SDA**).
- **Caroténoïdes** : Elles sont des pigments non azotés dont la coloration varie du jaune au rouge. La plupart des caroténoïdes sont des provitamines A indispensables aux hommes

et aux animaux (Wafa et Loubna 2020). La spiruline en contient entre 20 et 25 fois plus que les carottes. Le bêta-carotène représente 80% des caroténoïdes présents. Les caroténoïdes ont une action antiradicalaire. Ils participent également à la croissance et au développement de l'individu, ainsi qu'au maintien de la vision nocturne (Benmalek et Touahir SDA). Pour 10 g de spiruline, la proportion des pigments elle est énormément importante (tableau 11, figure 4)

Tableau 10: Teneurs en pigments exprimées en mg pour 10g de matière sèche de Spirulina plantensis (Pierlovisi, 2007).

Pigments	Teneur en mg/10g
Chlorophylles totales	115
Chlorophylle à	61-75
Caroténoïdes (orange)	37
Phycocyanine (bleu)	1500-2000
Phycoérythrine (rouge)	2900-10000

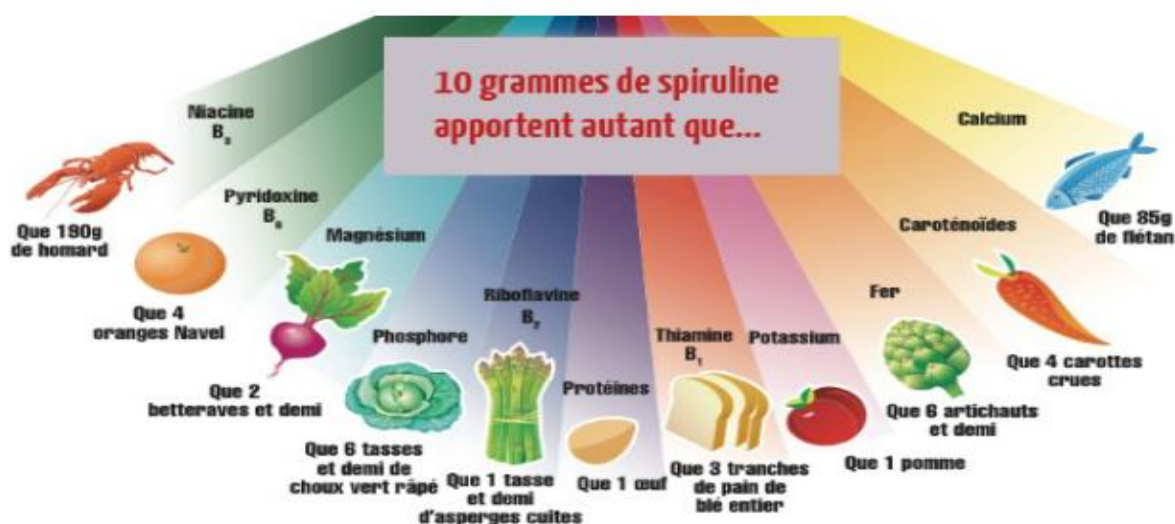


Figure 3 : les valeurs nutritives présentes dans 10 g de spiruline (Falquet et Hurni 1986).

La spiruline sert à lutter contre la malnutrition. Elle est utilisée à cette fin depuis plus de 30 ans par l'ONG genevoise Antenna Technologies pour maintenir en bonne santé les enfants de certaines tribus d'Afrique et de Madagascar, à l'image de la tribu Kanembous au

Chapitre 2 : Physiologie de la spiruline

Tchad qui cultive la spiruline naturelle depuis des centaines d'années et voit ses enfants en pleine santé (**Falquet et Hurni 1986**).

CHAPITRE 3 :
RÔLES DES
BIOFERTILISANTS

3. Généralité sur les biofertilisants

3.1. Définition

Les biofertilisants ou les fertilisants biologiques sont définis comme des préparations contenant des cellules vivantes ou des cellules latentes de souches efficaces de micro-organismes qui aident les plantes cultivées à absorber les nutriments par leurs interactions dans la rhizosphère lorsqu'elles sont appliquées à travers les semences ou le sol. Ils accélèrent certains processus microbiens dans le sol et augmentent ; étendue de la disponibilité des nutriments sous des formes facilement assimilables par les plantes (**Merzoug et Kada 2021**). Les biofertilisants contiennent des microorganismes vivants qui colonisent la rhizosphère et augmentent la disponibilité de nutriments et/ou stimulent la croissance des plantes.

3.2. Type de Bio fertilisant :

3.2.1. Bio fertilisant à base des bactéries solubilisatrices des éléments minéraux :

3.2.1.1. Bactéries solubilisant le phosphate (PSB) :

En plus de l'azote, il existe un autre nutriment nécessaire, vital qui permet d'assurer la croissance et le développement des plantes est le phosphore (P), mais le problème c'est que ils n'existent pas une source biologiquement disponible d'un phosphore soluble même si dans les sols riches, puisque la plupart du phosphore est trouvé sous des formes insolubles (**Toumi Nour Elhouda 2021**).

Pour résoudre ce problème les chercheurs ont trouvé que la dissolution des phosphates liés à l'activité des bactéries qui colonisent la rhizosphère tels que les PGPR appelant les bactéries solubilisant le phosphate PSB (Phosphate Solubilizing Bacteria) ont la capacité de solubilisée le phosphore en convertissant les formes insolubles en formes solubles via de différents mécanismes (**Floradin 2018**).

Le mécanisme le plus utilisé est la production d'acides organiques telle que les acides glycolique, oxalique, malonique...qui diminuent le taux de pH de la rhizosphère qui conduit à une désagrégation des liaisons dans les sources des phosphores insolubles contenant dans les sols comme le $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ (Chibani et al., 2017)

3.2.1.2. Bactéries solubilisant le silicate (SSB) :

micro-organismes sont capables de dégrader les silicates qui sont des minéraux formés à partir d'un motif élémentaire tétraédrique (SiO_4). Ils fournissent :

- Des ions H^+ dans le milieu favorisant ainsi l'hydrolyse.

- Les acides organiques comme l'acide citrique, l'acide oxalique, les acides aminés et les acides hydro- carboxyliques dont le complexe avec des cations permet de promouvoir leur enlèvement et leur rétention dans le milieu à l'état dissous (**Assemien 2018**).

De manière générale, les isolats bactériens fabriqués à partir de différents endroits ont un potentiel variable de solubilisation des silicates. Des études d'inoculation avec des isolats sélectionnés avec de la terre rouge, sol argileux, sablent et la terre vallonnée a montré que les organismes se multiplient dans tous les types de sol et libèrent plus de silice augmentant ainsi la disponibilité de la silice dans le sol et l'eau (**Assemien 2018**).

3.2.1.3. Bio fertilisant à base de rhizobactéries

Les rhizobactéries sont des bactéries qui présentent l'aptitude à coloniser les racines de façon intense (**Lemanceau 1992**). Les bactéries non symbiotiques répondant à cette définition appartiennent à différents genres et espèces dont les plus étudiés sont : *Agrobacterium radiobacter*, *Azospirillum* spp, *Bacillus* spp, *Pseudomonas* spp fluorescents (**Naidji Mériem 2020**).

Les effets bénéfiques des rhizobactéries sont liés à leur position stratégique à l'interface sol Racine. En effet, le rhizoplan et la rhizosphère sont le siège d'échanges intenses entre la plante et le milieu environnant (**Yala et al. 2018**). Ces échanges sont réciproques. Le rôle bénéfique du PGPR s'étend de la fixation de l'azote atmosphérique, de la solubilisation des phosphates, de la production de sidérophores, de la synthèse de régulateurs de croissance des plantes et de la protection conférée aux plantes par la production d'antibiotiques et aide finalement les plantes à acquérir une résistance. Les microbes sont également utilisés à des fins de bioremédiation et agissent ainsi comme un agent de nettoyage respectueux de l'environnement.

Les PGPR ont présenté un immense intérêt dans la communauté scientifique et sont devenus un outil très fiable pour une approche écologique et pour la production agricole durable (**Madjida 2022**).

3.2.1.4. Bio fertilisant à base des bactéries fixatrices d'azote

Une bactérie fixatrice d'azote est un microorganisme capable de capter l'azote atmosphérique, le di azote et de le restituer à la plante sous une forme assimilable : l'ammoniaque (Deacon). Ces bactéries mesurent environ 1 micromètre de moyenne, ce qui est environ 600 00 fois plus petits qu'un homme (**Pernelle 2019**). Parmi les bactéries fixatrices d'azote, on retrouve :

3.2.1.5. Bactéries non symbiotiques

Azotobacter :

Azotobacter spp. Sont des bactéries libres, à Gram négatif, de forme ovale ou sphérique, aérobie vivant dans le sol (**Dommergues et Mangenot 1970**). Azotobacter a été découvert pour la première fois par un microbiologiste et botaniste néerlandais Beijerinck en 1901 (**Marwa 2022**).

3.2.1.6. Bactérie symbiotique

Rhizobium :

La biodiversité microbienne constitue une ressource naturelle énorme pour l'humanité. Les Rhizobiums sont des bactéries du sol capables d'induire des nodules sur les racines ou les tiges de légumineuses et assurer la fixation de l'azote atmosphérique à l'intérieur de ces organes. En contrepartie de la fixation d'azote, les rhizobiums obtiennent un approvisionnement stable de carbone dérivé des composés de la photosynthèse (**Afaf**).

Azospirillum :

Le genre Azospirillum est l'un des PGPB les mieux étudiés et le plus utilisé en agriculture. Bien que plus de 20 espèces aient été décrites au sein du genre à l'heure actuelle (**Marwa 2022**), *A. brasilense* et *A. lipoferum* sont les mieux caractérisés à la fois biochimiquement et génétiquement (**Karaki 2013**) et les le plus largement utilisé dans les inoculants commerciaux.

Cyanobactéries : Les cyanobactéries sont des procaryotes (cellule dépourvue de noyau et d'organites intracellulaires) ; photosynthétiques également appelés cyanophytes ou cyanophycées. Les cyanobactéries font partie d'un groupe ancien de micro-organismes et une grande partie de leur diversité morphologique s'est développée il y a plus de 2 milliards d'années. Bien qu'elles soient aussi connues sous le nom d'algues bleu-vert ou algues bleues, les cyanobactéries sont des bactéries à Gram négatif photosynthétiques et non des algues (**Belmars 2015**).

Ce sont les cyanobactéries qui ont produit l'oxygène que nous respirons sur Terre et permis la formation de la couche d'ozone qui nous protège contre les rayons nocifs du soleil. Elles sont également à l'origine de toutes les plantes. Quoiqu'elles ne soient pas réellement des algues au même titre que les diatomées et les algues vertes par exemple, les cyanobactéries partagent les mêmes habitats compétitionnent pour les mêmes ressources et contribuent à la production primaire des écosystèmes aquatiques. Elles se regroupent en quelque 2 000 espèces réparties en 150 genres (**Belmars 2015**).

Les cyanobactéries jouent un rôle extrêmement important dans la détermination du chemin de l'évolution et des changements écologiques tout au long de l'histoire de la Terre. À la fin du Protérozoïque ou au début du Cambrien, les cyanobactéries ont commencé à s'installer au sein de certaines cellules eucaryotes, cet événement est appelé endosymbiose, pour l'origine des eucaryotes.

Les cyanobactéries ont le potentiel de fixer l'azote atmosphérique et pourraient donc servir de biofertilisants pour les cultures d'importance économique. La spiruline, une forme de cyanobactérie, est utilisée comme engrais naturel ou biostimulant, bénéfique pour l'environnement ainsi que pour la santé humaine et animale (**Belmars 2015**)

3.3. Spiruline

3.3.1. Historique

La spiruline est considérée par les biologistes comme l'une des premières plantes apparues sur terre, il y a quelque 3,5 milliards d'années. Les deux principales espèces de spiruline sont la spiruline maxima, originaire du Mexique, et la spiruline platensis, originaire du Tchad. la spiruline se développe à l'état naturel dans les lacs andins d'origine volcanique, ainsi que dans le lac Texaco au Mexique, cependant elle pousse aussi en Afrique dans de grands lacs, en particulier au Tchad, aujourd'hui l'engouement pour cette microalgue et l'augmentation de sa demande, a clairement développé sa culture à travers le monde (**Bennouh et Rezig s. d.**).

Définition :

La spiruline est une cyanobactérie de couleur bleu-vert photo eutrophe c'est un organisme procaryote qui partage avec les plantes la capacité d'effectuer de la photosynthèse. À partir de composés minéraux, d'eau, et de l'énergie lumineuse captée grâce à leur chlorophylle, elles transforment le gaz carbonique et dégagent l'oxygène (**Arbaoui et Aridj 2022**).

La communauté scientifique reconnaît que les cyanobactéries, constituant certaines des formes de vie les plus anciennes sur Terre, sont apparues il y a 3,5 milliards d'années (**Prescott et al. 2018**).



Figure 4 : Aspect microscopique de l'Arthrospira platensis (Vicenete, 2008)

3.3.2. Taxonomie

La spiruline est classée d'après Benahmed, (2012) comme suit :

- **Règne** : Monera
- **Group ou Sous Règne** : Procaryotes
- **Embranchement** : Cyanophyta
- **Class** : Cyanophyceae
- **Ordre** : Nostocales (Oscillatoriales)
- **Famille** : Oscillatoriaceae
- **Genre** : Oscillatoria
- **Sous genre** : Arthrospira
- **Espèces** : Arthrospira platensis

3.3.3. Morphologie de la spiruline

La spiruline est une cyanophycée microscopique pluricellulaire de couleur bleu vert d'une longueur moyenne d'environ 250µm. Elle ses filaments mobiles de 10 à 12µm de diamètre ne sont pas ramifiés et sont enroulés en spirale, habituellement en 6 ou 7 spires. Cette forme hélicoïdale lui confère l'apparence d'un petit ressort (Skanderi, Mammeri et Tchaker 2022).

On distingue trois morphologies sont :

Les droites : désigne les souches dont les filaments sont étirés.

Les spiralées : désigne les souches, dont les filaments de la forme d'une queue de cochon.

Les ondulées : désigne les souches, dont les filaments en spirale étirée.

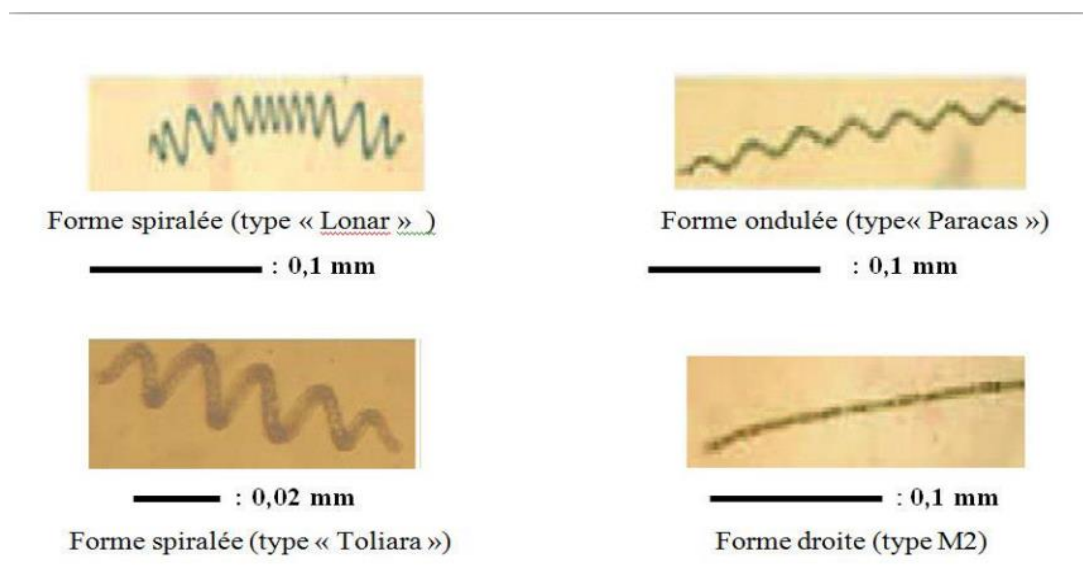


Figure 5 : Morphologies typiques de Spiruline (Source : Antenna Technologie).

3.3.4. Reproduction :

Elle se reproduit par bipartition simple par scission. Elle se produit de manière asexuée, grâce à la segmentation des filaments. Les nécridies sont des cellules spéciales formées par le filament de Spiruline à maturité. Ces cellules se distinguent des autres par leur forme biconcave et sont considérées comme des disques de séparation. De ces derniers, le trichome se divise en de nouveaux filaments de 2 à 4 cellules, connus sous le nom d'Hormogonie. Les Hormogonies vont augmenter en taille en divisant les cellules en deux (chacune des cellules donnera deux cellules par scissiparité) et adopter la forme classique hélicoïdale (Balloni et al. 1980 dans Charpy, 2008).

Dès que la température dépasse 30°C à l'ombre, sa multiplication est particulièrement rapide ; lorsque ces conditions sont remplies et que le milieu est propice, le temps de régénération est extrêmement court (7 heures).

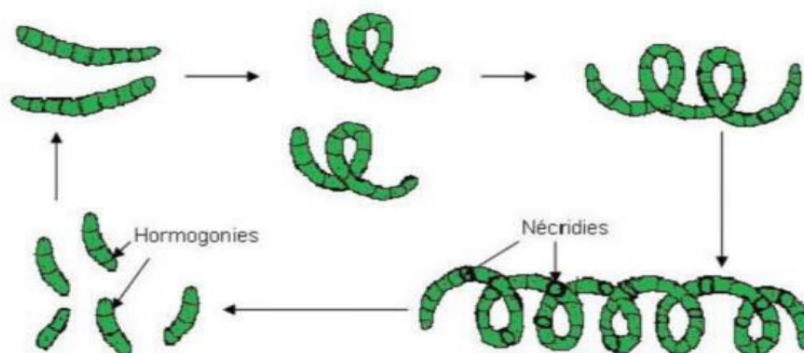


Figure 6 : Cycle de vie de la spiruline (Charpy, 2008)

3.3.5. Distribution géographique dans le monde :

La spiruline se développe préférentiellement dans des eaux chaudes, alcalines et riches en nutriments azotés et phosphorés. Plus communément, elle s'observe dans les eaux saumâtres, ainsi que dans les lacs salins de régions tropicales et semi-tropicales (Charpy, Langlade, et Alliod 2008b). Son caractère thermophile et ses besoins importants en lumière limitent son aire de répartition à une bande intertropicale située environ entre 35° de latitude Nord et 35° de latitude Sud.



Figure 7 : Zone de croissance naturelle de la Spiruline dans le monde (Fox, 1999)

3.3.6. Production mondiale :

On produit environ 1 kilo de spiruline dans le monde toutes les 3 secondes, principalement en Chine et aux États-Unis. La production annuelle de spiruline s'élève à 5 000 tonnes (Azizi et al. 2022b).

Il est difficile d'obtenir des informations sur la production mondiale actuelle et les coûts de la Spiruline en raison de la culture de la microalgue qui ne nécessite ni traitement ni cuisson. Une étude réalisée en 2000 par le bureau d'étude Tractebel Consult en collaboration avec le Centre Universitaire de Biotechnologie algale (CUBIA), en Belgique, montre une augmentation régulière de la production mondiale, notamment depuis 1995. De 1400 tonnes en 1995 à 3500 tonnes en 2000, elle dépasse les 4000 tonnes (Charpy, Langlade, et Alliod 2008c).

3.4. Intérêts et domaine d'utilisation

La spiruline joue un rôle important dans divers domaines en raison de ses propriétés nutritionnelles exceptionnelles, de ses bénéfices pour la santé, de son potentiel pour l'agriculture durable et de ses applications diverses (Hamza Cherif, Zenagui, et Doukara 2024).

3.4.1. Santé

Dans les pays industrialisés, et récemment dans quelques régions d’Afrique, la Spiruline est utilisée comme un complément alimentaire considéré comme avantageux pour la santé. Depuis longtemps, elle est conseillée comme supplément en cas de déficit en acides gras essentiels (Arbaoui et Aridj 2022c).

3.4.2. Produits cosmétiques et agroalimentaires

À l’échelle internationale, les produits de soins de la peau, les shampooings, les colorants, les masques, les crèmes et les toniques contenant ce microorganisme sont commercialisés. Elle est utilisée dans les masques cryogéniques et crèmes anti-âge, par son action sur le renouvellement cellulaire et la tonicité des tissus. Elle est aussi utilisée en synergie avec d’autres algues, comme agent cicatrisant et antiseptique. Ainsi dans l’alimentation humaine, en Suède, un pain à faible teneur en calories enrichi en Spiruline est vendu et en France, un pâté végétal, fabriqué en Spiruline, est vendu sous forme de pain (Troudi 2017).

3.4.3. Domaine animal

- Complément alimentaire : La spiruline est utilisée comme complément alimentaire chez les animaux de compagnie (chiens, chats, les chevaux, les vaches, les poules, les poissons et les oiseaux) (Hamza cherif et al. 2024).
- Favoriser la croissance et la fertilité : des études sur les poissons d’aquarium et la crevette ont montré les effets bénéfiques de *Spirulina platensis* en ce domaine (Langlade, Alliod et Charpy 2008)
- Renforcer les défenses immunitaires : La Spiruline est ajoutée aux granulés dans la nourriture des poissons d’élevage, plus souvent soumis à des infections virales ou bactériennes que les poissons sauvages, à cause de l’effet immunostimulant de *Spirulina platensis* (Hamza Cherif et al. 2024).

3.4.4. Domaine agricole :

- Bio-Engrais : La spiruline est un excellent biofertilisant en raison de sa riche composition en nutriments et en substances favorisant la croissance. La spiruline peut améliorer la fertilité du sol en augmentant sa teneur en éléments nutritifs et en favorisant une activité microbienne bénéfique lorsqu’elle est appliquée sur le sol. Cela conduit à un sol plus sain, ce qui est fondamental pour une croissance robuste des plantes (Skanderi et al. 2022).

- Promoteur de croissance des plantes : La spiruline contient des composés naturels favorisant la croissance comme les cytokinines, les auxines et les gibbérellines, des hormones essentielles qui régulent la croissance des plantes. Lorsque la spiruline est utilisée comme pulvérisation foliaire ou comme additif pour le sol, ces composés peuvent améliorer considérablement la croissance des plantes, entraînant ainsi une amélioration des rendements et de la qualité des cultures (**Skanderi et al. 2022**).
- Résistance aux ravageurs et aux maladies : L'application de spiruline dans la culture maraîchère peut renforcer la résistance des plantes aux ravageurs et aux maladies. Les antioxydants et les composés bioactifs de la spiruline renforcent les mécanismes de défense naturels de la plante, réduisant ainsi le besoin de pesticides chimiques (**Skanderi et al. 2022**).
- Augmentation du rendement et de la qualité des cultures : Les agriculteurs qui utilisent la spiruline dans le cadre de leur régime de gestion des cultures constatent souvent une augmentation du rendement et une amélioration de la qualité de leurs produits. Cela se traduit par une valeur marchande plus élevée et des bénéfices potentiellement plus importants (**Skanderi et al. 2022**).

Deuxième partie :

Étude

expérimentale

Deuxième partie : Étude expérimentale

Objectif de l'essai

L'objectif principal de cet essai est d'évaluer l'effet de la spiruline sur la culture du poivron, avec pour ambition d'explorer le potentiel des extraits aqueux de spiruline en tant que solution naturelle visant à améliorer les performances agronomiques et la qualité des fruits produits.

Matériel et Méthodes

Matériel végétal

Le matériel végétal employé dans cette étude est la variété de poivron "Venus 60", reconnue pour sa croissance vigoureuse et sa capacité à produire des fruits de bonne taille. Le cycle de développement de cette variété est relativement rapide, avec une période de maturation s'étalant entre 60 et 70 jours avant la récolte des premiers fruits mûrs. Ces caractéristiques en font une option particulièrement prisée par les producteurs pour des récoltes rapides et optimales.

Méthodes d'étude

Site expérimental

L'expérimentation s'est déroulée en deux phases distinctes. La première phase, consacrée à l'extraction de la spiruline, a été menée au sein du laboratoire de physiologie animale appliquée de la Faculté des sciences de la nature et de la vie de l'université de Mostaganem. La deuxième phase, portant sur la culture des poivrons en plein champ, s'est déroulée à la ferme expérimentale de l'université de Mostaganem, située dans la commune de Mazagran (Wilaya de Mostaganem).

Cette région est caractérisée par un climat semi-aride. Pendant la période estivale, l'hygrométrie se situe entre 60 % et 70 %, tandis que les températures moyennes varient de 25 à 30°C. En hiver, les températures sont plus fraîches, oscillant entre 6 et 13°C (ONM, 2017). Ces conditions climatiques sont représentatives des défis auxquels les cultures locales doivent s'adapter, ce qui renforce l'intérêt d'explorer des solutions naturelles, telles que l'usage de la spiruline, pour améliorer la résilience et la productivité des plantes.

Matériel biologique

Le matériel biologique utilisé dans ce travail est la souche de la spiruline, *Spirulina platensis*. Cette souche est originaire de la région de Tamanrasset.



Figure 8 : Spiruline solution mère (*Spirulina plantesis*) sous forme liquide (**Originale, 2024**)

2.1. Matériels utilisés

La liste des différents matériels utilisés lors de l'expérimentation est la suivante :

Pompe air aquarium (model: NB-8002B);	pH mètre
Source de chaleur (Résistance électrique)	Microscope optique.
Lumière artificiel LED ;	Thermomètre ;
Tuyaux + diffuser (bulle d'air)	Verrerie (Bécher, Pipette graduée, ...).
Les produits chimiques (composition de milieu utilisée).	Lames et lamelles

2.1.1. Milieu de culture

Il s'agit d'une solution de sels minéraux dans de l'eau. Ce liquide doit apporter à la spiruline. Tous les éléments chimiques qui lui sont nécessaires. Le pH du milieu de culture (c'est-à-dire son degré d'alcalinité) doit être entre 8.0 et 11.

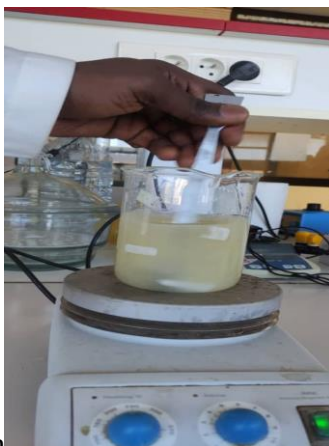


Figure 9 : Préparation du milieu de culture (Originale, 2024)

Tableau 11 : Composition du milieu de Zarrouk (pour un litre d'eau distillée)

Éléments	Quantité (g/l)	Quantité (g/5l)
Bicarbonate de sodium (NaHCO_3)	8	40
Sulfate d'ammonium ($\text{SO}_4(\text{NH}_4)_2$)	0,12	0,6
Sulfate de potassium (K_2SO_2)	0,1	0,5
Sulfate de fer (FeSO_4)	0,02	0,1
Urée	0,02	0,1
Chlorure de sodium (NaCl)	4	20

2.1.2. Culture de la spiruline

La souche de la spiruline est cultivée sous les conditions de laboratoire, les cultures sont réalisées dans des bouteilles d'eau de 5 litres. Nous avons démarré notre expérience avec un volume de 200 ml de la culture mère de la spiruline, auquel nous avons ajouté un volume 1000ml de milieu de culture Zarrouk (Nous avons utilisé le protocole de Gourida en 2012, qui préconise de mettre 1 volume de spiruline dans 5 volumes de milieu de culture. La culture de *Spirulina platensis* a été lancée le 01/04/2024 sous les conditions de :

- Le pH sera entre 8,5 et 10,5 (Jourdan 2006) naturellement, la spiruline à tendance à alcaliniser le milieu.
- La température du milieu de culture influence directement la vitesse de croissance de la spiruline : bien qu'assez résistante au froid (jusqu'à 3-5°C au-dessus de zéro), la spiruline ne commence à croître d'une manière appréciable qu'au-dessus de 20°C. La vitesse de croissance est maximale vers 35-37°C. Elle est assurée par un chauffage électrique d'aquarium.

- Une culture en bonnes conditions de concentration et de température pourra être exposée avec profit à un maximum de lumière naturelle. L'intervalle entre l'éclairage et l'obscurité est 12 heures et cela est assuré par une prise programmable (**Skanderi et al. 2022**). Nous avons remplacé la lumière naturelle par une ampoule de 45W.

L'agitation a été assurée par barbotage d'air à l'aide de pompes à air type d'Aquarium pendant 12 heures par jour. L'agitation est nécessaire pour homogénéiser, favoriser les échanges gazeux (l'élimination de l'oxygène et absorption du gaz carbonique) et assurer une bonne répartition de l'éclairage dans le liquide (**Jourdan 2006**).

Enfin, l'ensemencement la dernière opération de la préparation de la spiruline, il suffit de transvaser dans du milieu de culture neuf un certain volume de culture mère jusqu'à ce que la couleur devienne verte.

2.1.3. Protocole d'obtention de la spiruline

Dans un bidon de 5 litres, un mélange de 200 ml de spiruline et 800 ml du milieu de culture à la date du 11/12/2024, ce travail a été réalisé au laboratoire de nutrition (INES) (Photo). Ce protocole nécessite les étapes suivantes :

- Riser bien les matériels utilisés
- Préparer milieu de culture
- Ensemencement (5 litres de culture)
- Assuré un éclairage pendant nuit
- Installation pompe à aquarium immergée dans le bidon pour une bonne circulation de l'aire
- Fermé bien et contrôle tous les paramètres pour obtenir une bonne culture de spiruline.



- a) Ensemencement de la spiruline
b) Dilution de la spiruline

Figure 10 : a et b Préparation de la solution de la spiruline (Originale, 2024)

2.1.4. Étude de caractérisation de la spiruline

- **Étude morphologique**

La forme et la couleur de la spiruline varient en fonction du caractère physique et chimique du milieu environnant dans lequel vit la spiruline. Le suivi de la morphologie a été réalisé par des observations à l'aide d'un microscope optique.



Figure 11 : Spiruline vue au microscope (Originale, 2024)

2.2. Récolte de la spiruline

La récolte consiste à filtrer avec une pompe puis la biomasse est pesée à l'aide d'une balance de précision.

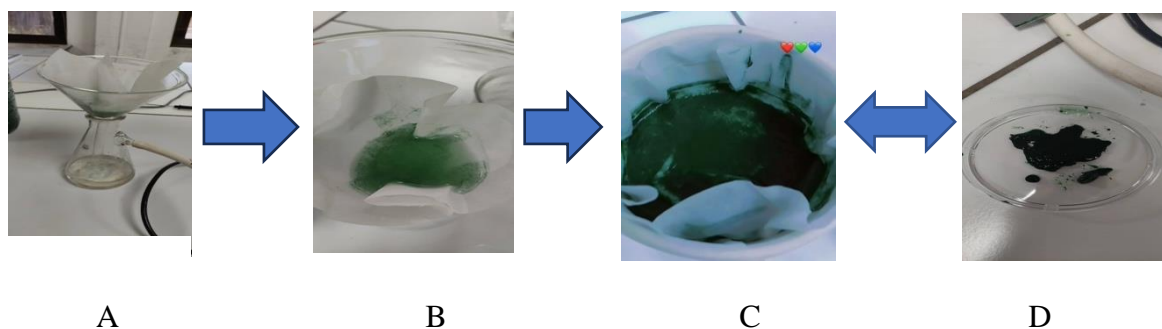


Figure 12 : Étapes de la récolte de la spiruline (Originale, 2024).

2.3. Préparation de l'extrait de spiruline

Après la récolte de la spiruline, le résidu est souvent lavé deux fois avec de l'eau distillée pour éliminer les impuretés potentielles. Ensuite, il est généralement congelé à -20°C jusqu'à ce qu'il soit prêt à être utilisé. Pour préparer une macération aqueuse, 1.5 gramme de spiruline en poudre congelée est ajouté à 1 litre d'eau distillée.

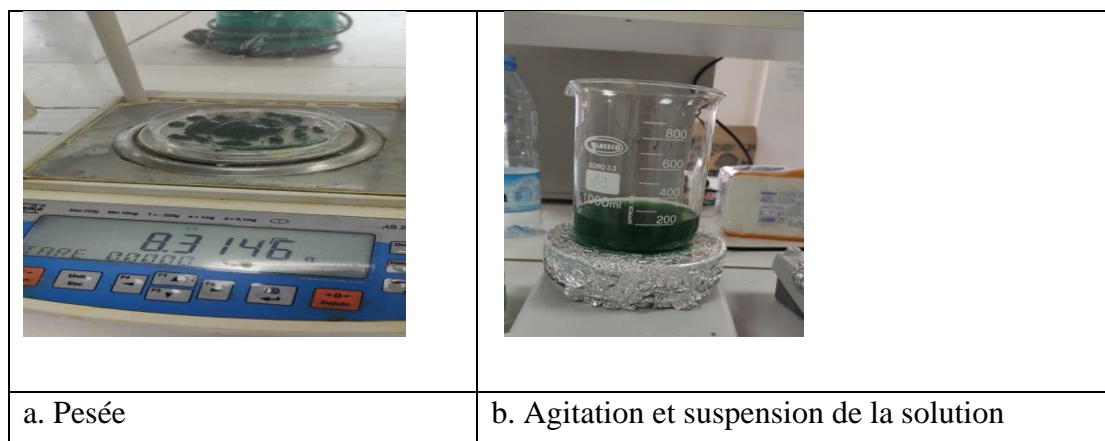


Figure 13: Opérations de la pesée, agitation et suspension de la spiruline (Originale, 2024)

Une fois que la spiruline est ajoutée à l'eau, l'échantillon est agité vigoureusement par l'agitateur. Ce processus permet d'extraire les composés bioactifs et nutritifs de la spiruline dans l'eau, formant ainsi un extrait aqueux. L'extrait a été refroidi et maintenu à une

température de -5°C jusqu'à son utilisation ultérieure. Pour tester l'effet d'extrait trois dilutions sont préparées (50, 100 et 150 %), soit 50, 100 et 150 ml respectivement de l'extrait pur ont été dissoutes dans 1 litre d'eau distillée ensuite agitée vigoureusement (Shimaa et al., 2017).



Figure 14 : : Extrait de la spiruline

2.6. Détermination de la capacité au champ

Par la méthode de Dolgov (1948)

- On remplit un pot de 100g de substrat (terre) (PS)
- On remplit le substrat avec de l'eau jusqu'à saturation puis on le fait trouser et on laisse pendant 24 heures
- après 24 heures, on détermine le poids frais (PF).

2.4. Calcul de la capacité au champ (Hcc)

La Hcc de notre sol est déterminée selon la formule suivante :

$$Hcc = (PF-PS/PS) \times 100$$

PF: Poids frais

PS : Poids sec

2.4.1. Dispositif expérimental

Tableau 12: Dispositif experimental

Bloc 1	Blocs 2	Blocs 3	Blocs 4	Blocs 5	Blocs 6
D4	D1	D3	D1	D2	D3

D1	D2	D4	D3	D4	D2
D2	D3	D2	D4	D3	D1
D3	D4	D1	D2	D1	D4

Blocs : 6 répétitions

Traitements : 4 Doses de spiruline (0, 50, 100 et 150%)

Matériel végétal : 1 Variété « Venus 60 »



Figure 15 : Dispositif expérimental (Originale, 2024).

2.4.2. Étapes du travail

Figure 16 : A : Plants de poivrons dans les alvéoles ; B : Dispositif expérimental en bloc ; C : Plant 4-5 feuilles ; D : Stade de floraison ; E : Formation des fruits (Originale, 2024).



A



B



C



D



E

2.4.3. Apports de la spiruline

Les différentes dilutions d'extrait de *Spiruline platensis* ont été appliquées sur des plantules de poivron (variété Venus 60). Le dispositif expérimental comprenait 24 plants répartis en 4 traitements, avec 6 plants par traitement. Les traitements incluaient l'absorption racinaire avec trois dilutions différentes (5%, 10%, et 15% d'extrait) ainsi qu'un témoin arrosé avec de l'eau courante. Les traitements ont été administrés par absorption racinaire à l'aide d'un récipient de 1000 ml, permettant d'administrer un volume égal à toutes les plantes de poivron. Les dilutions d'extrait ont été renouvelées tous les 10 jours pendant les deux premiers mois de l'expérience, avec une seule application supplémentaire pendant la période de floraison.

2.5. Paramètres morphologiques étudiés

Les plantes sont traitées pendant deux mois, à la fin on procède à la mesure des paramètres morphologique :

2.5.1. Nombre de feuilles

Durant le stade de la croissance, le nombre de feuilles a été compté

2.5.2. Longueur de la tige

Après chaque apport de la spiruline on procède à la mesure, de longueur (LT) à l'aide d'une règle graduée, durant la phase de croissance des plantules jusqu'à la formation du fruit.

2.5.3. Taille de la feuille

À l'aide d'une règle graduée, nous avons pu mesurer la taille d'une feuille.

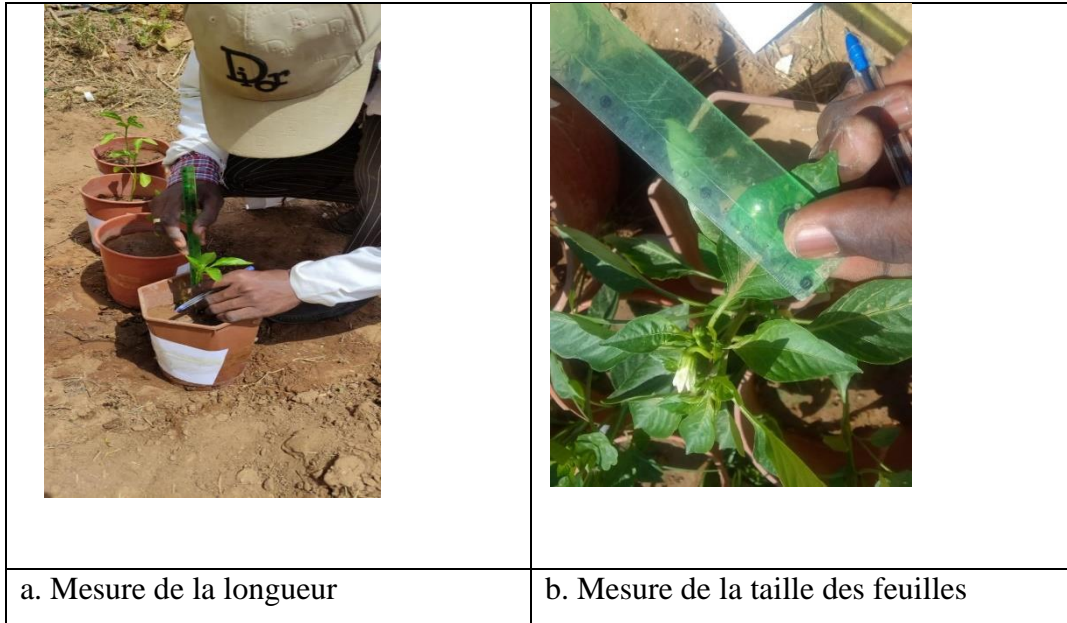


Figure 17 : Mesures de la longueur et de la taille des feuilles (**Original, 2024**).

Troisième partie :
Résultats et
discussion

3. Troisième partie : Résultats et discussion

3.1. Longueur de la tige

Les résultats de la longueur de la tige en fonction de la dose de spiruline utilisée sont illustrés dans la figure 18

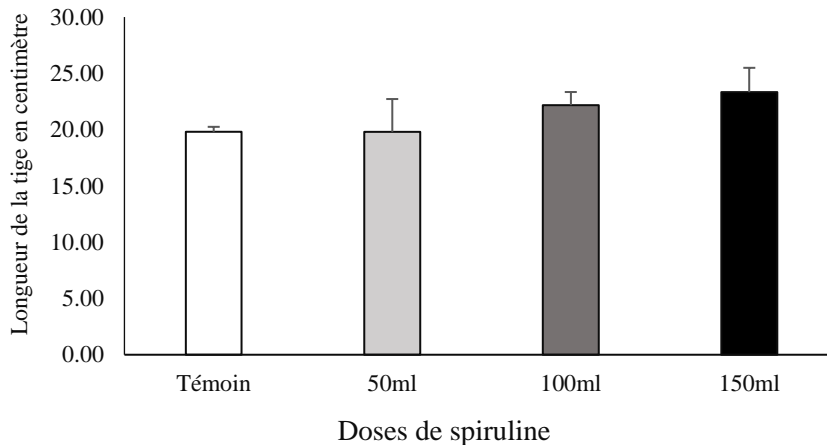


Figure 18 : Longueur de la tige de la variété Vénus 60 « *Capsicum annuum L.* » traitée avec de la spiruline. Les valeurs sont les moyennes de six répétitions et les barres verticales indiquent les écarts types.

Les résultats ont montré une augmentation de la longueur de la tige en fonction de l'apport de spiruline. La longueur moyenne des tiges est passée de 19,80 cm dans le groupe témoin à 22,17 cm et 23,33 cm respectivement pour les traitements avec 100 ml et 150 ml de spiruline. En comparaison, le traitement avec 50 ml de spiruline n'a pas entraîné de variation significative, avec une longueur de tige identique à celle du témoin, soit 19,80 cm.

L'analyse agronomique révèle que les traitements avec 150 ml et 100 ml de spiruline ont produit les longueurs de tiges les plus élevées, soit 23,33 cm et 22,17 cm respectivement, dépassant celles du témoin. En revanche, le traitement avec 50 ml de spiruline n'a pas montré de différence par rapport au témoin, avec une longueur de tige similaire de 19,80 cm (Figure18).

Les calculs statistiques ont montré une différence significative avec une probabilité (* à $p < 0.01$) (Tableau 14).

Résultats et discussion

Tableau 13 : Analyse de variance à 1 facteur à $p=5\%$ de la longueur de la tige de poivron « *Capsicum annuum L.* » traitée avec de la spiruline.

Source des variations	dl	F	Probabilité
Traitements	3	3,408	*
Total	23		

dl: degré de liberté, F: coefficient de Student (test à 5%), ns: non significative, * : $P < 0.05$,

** : $P < 0.01$, *** : $P < 0.001$.

3.2. Taille de la feuille

Les résultats de l'effet des différentes doses de spiruline sur les tailles de feuilles sont illustrés dans la figure 19

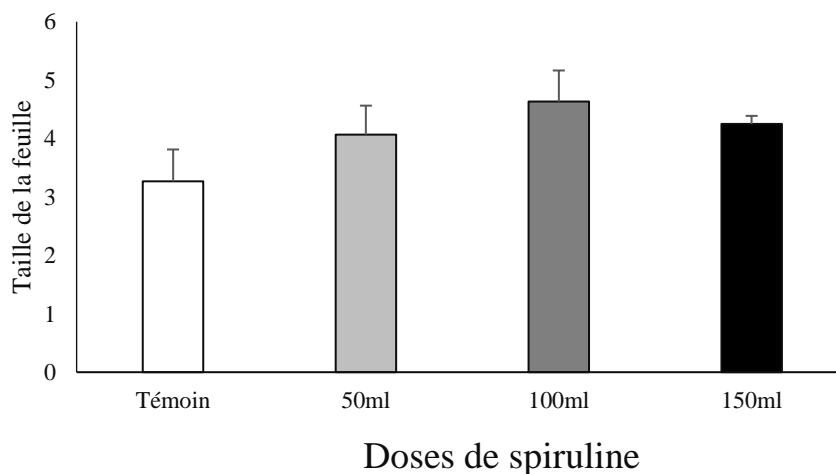


Figure 19 : Taille de la feuille de la variété Vénus 60 « *Capsicum annuum L.* » traitée avec de la spiruline. Les valeurs sont les moyennes de six répétitions et les barres verticales indiquent les écarts types.

La taille moyenne des feuilles de plants de poivron a augmenté avec l'apport croissant de spiruline, atteignant un maximum de 4,63 cm avec 100 ml de spiruline. Cependant, cette taille a diminué légèrement à 4,25 cm pour une dose de 150 ml, comparativement au groupe témoin qui a enregistré une taille de 3,27 cm (Figure 19).

L'activité stimulatrice des extraits de spiruline semble être influencée par la dose appliquée. Elle a suivi une progression croissante selon l'ordre suivant : Témoin < dilution 5 % < dilution 10 % > dilution 15 % (Figure 19). L'analyse statistique a révélé un effet hautement

Résultats et discussion

significatif de la spiruline sur la taille des feuilles (***, $P < 0,001$), comme indiqué dans le Tableau 15.

Tableau 14 : Analyse de variance à 1 facteur à $p=5\%$ de la taille des feuilles par plant de la variété Vénus 60 « *Capsicum annuum L.* » traitée avec de la spiruline.

Source des variations	Dl	F	P	Valeur critique pour F
Doses	3	9,389	***	3,098
À l'intérieur des groupes	20			
Total	23			

DL: Degré de liberté, F: coefficient de Student (test à 5%), ns: non significative, * : $P < 0.05$, ** : $P < 0.01$, *** : $P < 0.001$.

3.3. Nombre de feuilles par plant

Les résultats concernant le nombre de feuilles par plant sous l'effet de la spiruline ont montré une augmentation notable. Le traitement avec 100 ml de spiruline a produit le nombre le plus élevé, avec 41,33 feuilles par plant, suivi par le traitement avec 150 ml, qui a généré 39,67 feuilles. Le traitement avec 50 ml a quant à lui enregistré 34,83 feuilles, tandis que le groupe témoin a affiché 31,67 feuilles (Figure 20).

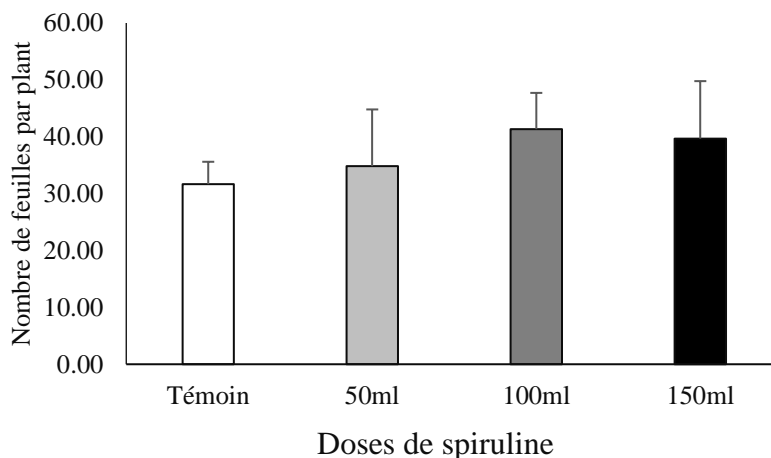


Figure 20 : Nombre de feuilles par plant de la variété Vénus 60 « *Capsicum annuum L.* » traitée avec de la spiruline. Les valeurs sont les moyennes de six répétitions et les barres verticales indiquent les écarts types.

Résultats et discussion

L'analyse de la variance à un facteur n'a donné aucune différence significative avec $p=0.174$ (Tableau 16).

Tableau 15 : Analyse de variance à 1 facteur à $p=5\%$ de nombre de feuilles par plant de poivron « *Capsicum annuum L.* » traitées avec de la spiruline.

Source des variations	dl	F	Probabilité	Valeur critique pour F
Entre groups	3	1,83	Ns	3,098
Total	23			

dl: degré de liberté, F: coefficient de Student (test à 5%), ns: non significative, * : $P < 0.05$, ** : $P < 0.01$, *** : $P < 0.001$.

3.4. Nombre de fleurs par plant

Les résultats du nombre de fleurs par plant sont illustrés dans la figure 21

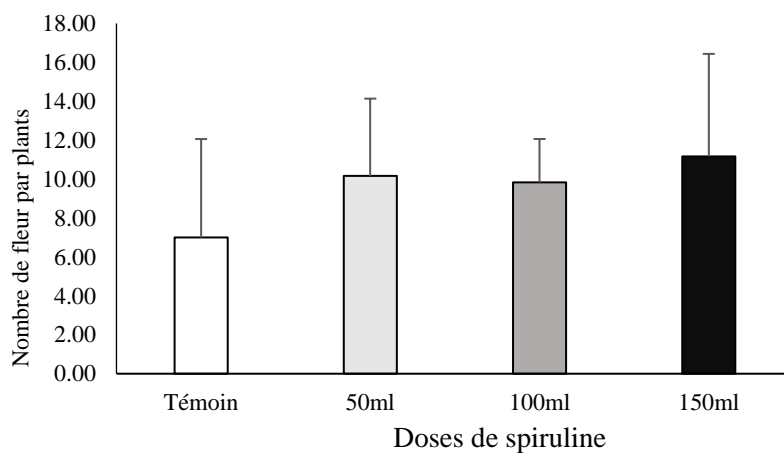


Figure 21 : Nombre de fleurs par plant de la variété Vénus 60 « *Capsicum annuum L.* » traitée avec de la spiruline. Les valeurs sont les moyennes de six répétitions et les barres verticales indiquent les écarts types.

La Figure 21 montre le nombre de fleurs par plant sous l'effet des différentes doses de spiruline, avec 10,17 fleurs pour 50 ml, 9,83 fleurs pour 100 ml, et 11,17 fleurs pour 150 ml, comparativement au témoin qui a produit 7 fleurs par plant. Il est important de noter que le traitement avec 150 ml a donné le plus grand nombre de fleurs par plant.

Cependant, l'analyse statistique n'a révélé aucune différence significative entre les traitements, avec une valeur de $p = 0,398$ (Tableau 17).

Résultats et discussion

Tableau 16: Analyse de variance à 1 facteur à $p=5\%$ pour le nombre de fleurs par plant de poivron « *Capsicum annuum* L. » traitées avec de la spiruline.

Source des variations	DL	F	Probabilité	Valeur critique pour F
Entre Groupes	3	1,033	ns	3,098
Total	23			

DL: Degré de liberté, F: coefficient de Student (test à 5%), ns: non significative, * : $P < 0.05$, ** : $P < 0.01$, *** : $P < 0.001$.

3.5. Nombre de fruits par plant

Le nombre de fruits par plant est illustré dans la figure 22

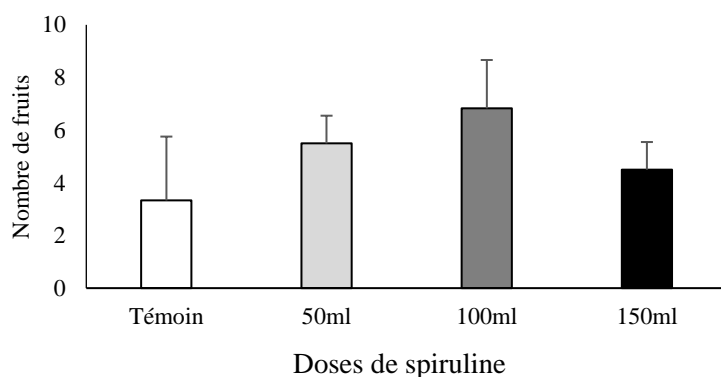


Figure 22 : Nombre de fruits par plant chez la variété Vénus 60 « *Capsicum annuum* L. traité avec de la spiruline. Les valeurs sont les moyennes de six répétitions et les barres verticales indiquent les écarts types.

Les résultats montrent que le nombre de fruits par plant sous l'effet des différentes doses de spiruline, avec 5.5 fruits pour 50 ml, 6.83 fruits pour 100 ml, et 4.5 fruits pour 150 ml, comparativement au témoin qui a produit 3.33 fruits par plant. Il est important de noter que le traitement avec 100 ml a donné le plus grand nombre de fruits par plant.

Cependant, l'analyse statistique n'a révélé aucune différence significative entre les traitements, avec une valeur de $p = 0,398$ (Tableau 17).

Résultats et discussion

Tableau 17: Analyse de variance à 1 facteur à p=5% nombre de fruits par plant de poivron « *Capsicum annuum* L. » traité avec de la spiruline

Source des variations	Dl	F	Probabilité	Valeur critique pour F
Entre groupes	3	0,909	Ns	3,098
Total	23			

dl: degré de liberté, F: coefficient de Student (test à 5%), ns: non significative, * : $P < 0.05$, ** : $P < 0.01$, *** : $P < 0.001$.

3.6. Poids moyen du fruit par plant

Les résultats du poids moyen du fruit par plant sont illustrés dans la figure 23

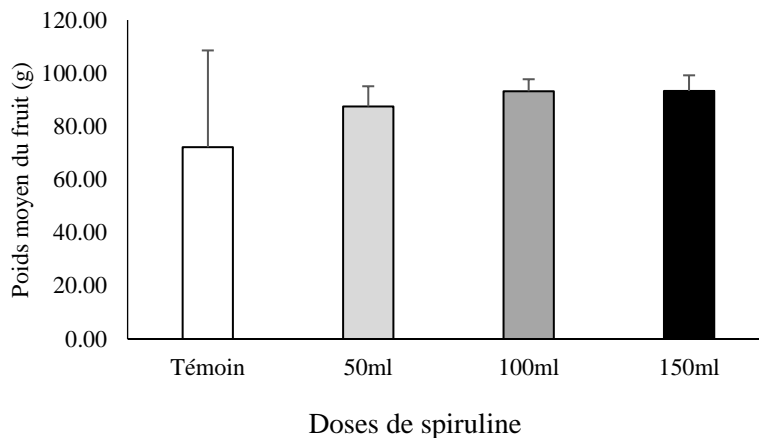


Figure 23 : Poids moyen du fruit par plant chez la variété Vénus 60 « *Capsicum annuum* L. » traitée avec de la spiruline. Les valeurs sont les moyennes de six répétitions et les barres verticales indiquent les écarts types.

Le poids moyen des fruits a augmenté progressivement avec l'augmentation de la dose de spiruline. Il est passé de 72,17 g chez le témoin à 87,48 g avec une dose de 50 ml de spiruline, puis à 93,19 g à 100 ml, pour se stabiliser à 93,32 g avec 150 ml de spiruline (Figure 23). Cependant, l'analyse de la variance à un facteur (ANOVA) n'a révélé aucune différence significative entre les différents traitements ($P > 0,05$) (Tableau 19), indiquant que l'augmentation des doses de spiruline n'a pas eu d'effet statistiquement significatif sur le poids des fruits.

Résultats et discussion

Tableau 18 : Analyse de variance à 1 facteur à $p=5\%$ pour le poids moyen du fruit par plant de poivron « *Capsicum annuum L.* » traité avec de la spiruline.

Source des variations	Dl	F	Probabilité	Valeur critique pour F
Entre groupes	3	1,657	Ns	3,098
Total	23			

dl: degré de liberté, F: coefficient de Student (test à 5%), ns: non significative, * : $P < 0.05$, ** : $P < 0.01$, *** : $P < 0.001$.

3.7. Rendement moyen de fruits par plant

La figure 24 a indiqué que le rendement moyen de fruits par plant a augmenté sous l'effet de la spiruline. Le rendement affiché a été de 478.33, 631.67 et 416.67g respectivement sous l'effet de 50, 100 et 150ml de spiruline contre 290.83 g par les plants témoins.

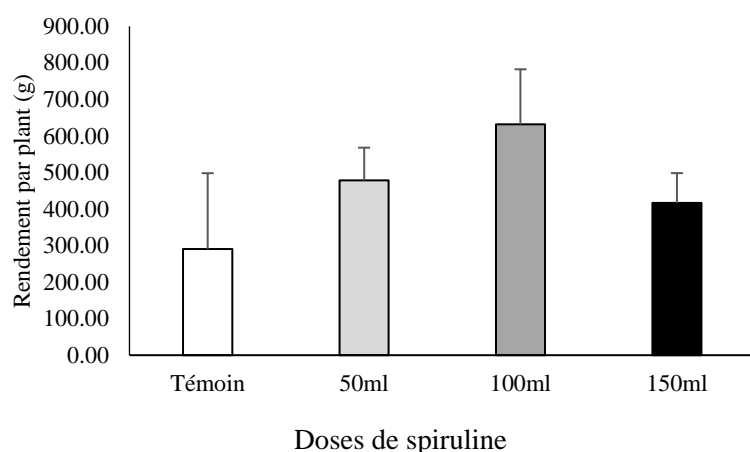


Figure 24 : Rendement moyen du fruit par plant chez la variété Vénus 60 « *Capsicum annuum L.* » traitée avec de la spiruline. Les valeurs sont les moyennes de six répétitions et les barres verticales indiquent les écarts types.

L'analyse de la variance à 1 facteur a donné une différence très significative entre les traitements (** à $P < 0.01$ (Tableau 20)).

Tableau 19 : Analyse de variance à 1 facteur à $p=5\%$ pour le rendement moyen du fruit par plant de poivron « *Capsicum annuum L.* » traité avec de la spiruline.

Source des variations	Dl	F	Probabilité	Valeur critique pour F
-----------------------	----	---	-------------	------------------------

Résultats et discussion

Entre groups	3	5,997	**	3,098
Total	23			

dl: degré de liberté, F: coefficient de Student (test à 5%), ns: non significative, * : $P < 0.05$,

** : $P < 0.01$, *** : $P < 0.001$.

DISCUSSION

Discussion

L'utilisation des biofertilisants, notamment des cyanobactéries comme la spiruline (*Spirulina platensis*), a suscité un intérêt croissant en agriculture en raison de leur capacité à améliorer la croissance végétative des plantes. Plusieurs études ont démontré que les cyanobactéries, en tant que biofertilisants, favorisent non seulement la fixation de l'azote atmosphérique, mais aussi la production de composés bénéfiques pour les plantes, tels que les hormones de croissance, les vitamines et les minéraux (Raia et al., 2018). En particulier, l'application de spiruline sur des cultures telles que le poivron a montré des résultats prometteurs en stimulant divers paramètres de croissance.

L'application d'une dose de 100 ml de spiruline sur la plante de poivron a conduit à une amélioration significative de plusieurs paramètres physiologiques : la longueur de la tige, le nombre de feuilles, le nombre de fleurs, et le rendement en fruits. Ces résultats concordent avec ceux de *Bhardwaj et al.* (2014), qui ont observé une stimulation marquée de la croissance des plantes suite à l'absorption racinaire de l'extrait de spiruline. Ces auteurs suggèrent que la spiruline peut constituer une alternative viable aux engrais chimiques, grâce à sa capacité à enrichir le sol en nutriments essentiels et à stimuler directement les mécanismes de croissance des plantes.

De manière similaire, *Aghofack-Nguemezi et al.* (2015) ont démontré les effets positifs de la spiruline sur la culture de la tomate. Ils ont observé une augmentation significative de la taille des plants, du diamètre de la tige, du nombre de fruits par plante et de la biomasse des parties aériennes. Les travaux de *Tarraf et al.* (2015) sur le fenugrec corroborent ces observations, en montrant que l'apport de spiruline augmente la surface foliaire, la teneur en chlorophylle, en caroténoïdes, et en hormones de croissance telles que les gibbérellines.

Les effets bénéfiques observés peuvent être attribués à la composition biochimique riche de la spiruline. Cette cyanobactérie contient des polypeptides, des acides aminés, des acides organiques, des vitamines et des enzymes qui participent à l'amélioration du métabolisme cellulaire des plantes, augmentant ainsi leur croissance et leur rendement (Tarraf et al., 2015). En particulier, les hormones végétales présentes dans la spiruline, telles que les auxines et les cytokinines, jouent un rôle crucial dans la régulation de la division cellulaire, de l'élongation des cellules et de la différenciation des tissus, ce qui stimule la croissance végétative.

D'autre part, les polysaccharides contenus dans la spiruline contribuent à améliorer la structure du sol. Selon *Skanderi et al.* (2022), ces polysaccharides améliorent la capacité du sol

à retenir l'eau, favorise le développement des racines et stimule la croissance de bactéries bénéfiques, ce qui facilite l'absorption des minéraux par les racines.

Il est important de souligner que l'utilisation de la spiruline présente des avantages écologiques par rapport aux engrais chimiques traditionnels. *Jean et al. (2015)* ont rapporté que l'amendement avec la spiruline non seulement améliore la croissance et le rendement des cultures, mais renforce également leur résistance au stress biotique et abiotique, offrant ainsi une alternative durable aux intrants chimiques. Cette caractéristique rend la spiruline particulièrement attrayante dans un contexte agricole cherchant à réduire l'impact environnemental tout en maintenant des rendements élevés.

Par ailleurs, *Yanni et al. (2020)* et *Al Dayel et El Sherif (2022)* ont observé que la spiruline augmentait la production de pigments photosynthétiques et les rendements des cultures comme le *Curcuma longa*, suggérant une large applicabilité de ce biofertilisant à diverses espèces végétales. Ces résultats soulignent l'intérêt croissant pour l'utilisation des microalgues dans l'agriculture biologique et intégrée.

Conclusion

Conclusion

L'objectif principal de cette étude était d'évaluer les effets des extraits de spiruline (*Spirulina platensis*) sur la croissance et le rendement du poivron (*Capsicum annuum*). Les résultats obtenus montrent que l'application de spiruline, sous différentes concentrations, exerce un effet significatif sur plusieurs paramètres physiologiques, tels que la longueur des tiges, le nombre de feuilles, le nombre de fleurs, ainsi que le poids moyen des fruits. Les traitements à 10 % et 15 % d'extrait de spiruline ont donné les meilleurs résultats, avec des améliorations notables par rapport aux plants témoins, notamment en termes de croissance végétative et de rendement en fruits.

Cependant, certaines limites doivent être prises en compte. Bien que les résultats aient montré des tendances d'amélioration, l'analyse statistique n'a pas révélé de différences significatives pour certains paramètres, notamment le poids des fruits et le nombre de fleurs entre les doses de spiruline. Cela pourrait être attribué à des facteurs tels que la variabilité individuelle des plants, les conditions environnementales incontrôlées, ou des effets de seuil dans la réponse des plantes. De plus, les essais ont été conduits dans des conditions contrôlées, ce qui limite l'extrapolation des résultats aux environnements agricoles réels, où des variables telles que les fluctuations climatiques ou la pression pathogène doivent être prises en compte.

Malgré ces limitations, cette étude ouvre des perspectives intéressantes pour l'utilisation de la spiruline comme biofertilisant dans l'agriculture durable. En améliorant la croissance et le rendement des plantes, tout en réduisant la dépendance aux engrais chimiques, la spiruline pourrait jouer un rôle important dans le développement de pratiques agricoles respectueuses de l'environnement. Les propriétés de la spiruline, comme la stimulation de la microflore du sol et l'amélioration de la rétention d'eau, en font un candidat prometteur pour une utilisation à plus grande échelle.

Pour les recherches futures, il serait pertinent d'étendre l'expérimentation à des cultures en champ ouvert, afin de mieux comprendre les effets de la spiruline dans des environnements naturels, sous différentes conditions climatiques et édaphiques. Il serait également judicieux d'étudier les impacts à long terme de l'utilisation de la spiruline sur la structure et la fertilité des sols, ainsi que sur la biodiversité microbienne. Enfin, une analyse économique approfondie

permettrait de déterminer la viabilité commerciale de la production et de l'utilisation de la spiruline à grande échelle comme biofertilisant.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

1. **Ait Issad, Hassina. 2020.** « Déploiement intelligent de drones pour une agriculture du futur. » PhD Thesis, Université Mouloud Mammeri.
2. **Akretche, Dyhia, et Sarah Mokrani. 2020.** « Etude bibliographique portant sur les activités biologiques des algues marines ». PhD Thesis, Université Mouloud Mammeri.
3. **Arbaoui et Aridj 2022.** Intérêt alimentaire et biotechnologique de la spiruline »
4. **Assemien 2018.** « Impact de pratiques agricoles conventionnelles et innovantes sur la fertilité des sols et les acteurs microbiens impliqués dans la zone de savanes humides de Côte d'Ivoire ». PhD Thesis, Université de Lyon ; Université Nangui Abrogoua (Abidjan).
5. **Aziz et al. 2022.** « Incorporation de la spiruline dans un fromage fabriqué à partir de lait de vache ».
6. **BECHAR, Kamar, Soltana SADOU, et Souad SADOK. 2020.** « Effet de la pouzzolane et les fibres de palmier dattier (*Phoenix dactylifera*) sur le substrat horticole du poivron (*Capsicum annuum*) cultivée hors sol ».
7. **Becerra-celis 2009.** « Proposition de stratégies de commande pour la culture de microalgue dans un photobioréacteur continu ». PhD Thesis, Châtenay-Malabry, Ecole centrale de Paris.
8. **Belmars 2015.** « Contribution à l'identification des cyanobacteries du barrage Zit El-Emba (Skikda) ».
9. **Ben Naceur et al., 2001.** « Extraction des huiles essentielles riches en anti-oxydants à partir de produits naturels et de co-produits agroalimentaires ». PhD Thesis, Université d'Avignon.
10. **Benmalek et Touahir SDA.** « RECHERCHE DE L'ACTIVITE ANTIMICROBIENNE DE LA SPIRULINE (*Arthrospira platensis*) ». PhD Thesis, UNIVERSITE KASDI MERBAH-OUARGLA.
11. **Bensehaila 2016.** « Étude de l'effet antimicrobien et antidiabétique des probiotiques en association avec de la spiruline ». PhD Thesis, lynda Boutekrabt.

Références bibliographiques

12. **Bousbia, 2011.** « Extraction des huiles essentielles riches en anti-oxydants à partir de produits naturels et de co-produits agroalimentaires ». PhD Thesis, Université d'Avignon.
13. **Chahrazed, Ramlia Belkis, et Chaima 2022.** « Propriétés et intérêts thérapeutiques d'une substance naturelle. »
14. **Charpy, 2008.** « La Spiruline peut-elle être un atout pour la santé et le développement en Afrique ». Rapport d'expertise pour le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, 49pp.
15. **Claude 2013.** *Les lipides–nutrition et santé.* Lavoisier.
16. **Elheme, Rouimel, et Ouanas 2021.** « Intoxication chronique au cuivre chez les ovins ». PhD Thesis, Université-Jijel-.
17. **Falquet et hurni 1986.** *Spiruline : aspects nutritionnels.* Flamant vert France.
18. **Floradin 2018.** « Réduction du risque environnemental associé au phosphore alimentaire chez le poulet de chair par une diminution du phosphore soluble dans les effluents ».
19. **Gallier 2020.** « Entre phénomènes de mode et nouvelles tendances de consommation ».
20. **Giraudeau 1993.** « Thèse d'exercice ».
21. **Hamza cherif et al. 2024.** « Production et valorisation De la Spiruline ». PhD Thesis.
22. **Hanane 2020.** « Intitulé : Effet de l'extrait standardisé du Ginkgo biloba sur la production des nitrites lors des maladies inflammatoires. » PhD Thesis, Université laarbi tebessi tebessa.
23. **Jourdan. 2006.** « Cultivez votre spiruline ». Edt. Antenna Technologie : 146p
<http://www.antenna.ch/documents/manuelJourdan2061.pdf>.
24. **Kanehisa et al. 2023.** « KEGG for taxonomy-based analysis of pathways and genomes ». *Nucleic acids research* 51(D1): D587-92.
25. **Langlade, Alliod et Charpy 2008.** « Utilisations de la spiruline autres que pour la malnutrition ». P. 129 in *COLLOQUE INTERNATIONAL « SPIRULINE ET DÉVELOPPEMENT »*.
26. **Marwa 2022.** « Les PGPR et leur impact sur la biofertilisation ». PhD Thesis, university center of abdalhafid boussouf-MILA.

Références bibliographiques

- 27. Menal, Taders, et chergui 2021.** « Etude sur les effets bénéfiques de la spiruline ».
- 28. Merzoug et Kada 2021.** « Isolement et caractérisation des souches de Rhizobium pour la production de bioengrais ». PhD Thesis, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie.
- 29. Mollo et noury 2013.** *Le Manuel du plancton*. Vol. 195. ECLM.
- 30. Nor Elhouda 2022.** « Etude des compléments alimentaires à base de magnésium ». PhD Thesis, university center of abdalhafid boussouf-MILA.
- 31. Oertli et frossard 2013.** *Mares et étangs : Ecologie, conservation, gestion, valorisation*. PPUR Presses polytechniques.
- 32. Pernelle, Jean-Jacques. 2019.** « Les bactéries ressemblent-elles à des saucisses cocktail ? 80 clés pour comprendre le monde bactérien ». *Les bactéries ressemblent-elles à des saucisses cocktail ?* 1-152.
- 33. Pilette et al. 2003.** « L'allergie aux albumines sériques ». *Revue française d'allergologie et d'immunologie clinique* 43(3) :180-85.
- 34. Prescott et al. 2018.** *Microbiologie*. De Boeck Supérieur.
- 35. SKANDERI, Mounia, Abdelghani MAMMERI, et FZ TCHAKER. 2022.** « Effets des extraits de la spiruline spirulina platensis sur les défenses naturelles des plantes ». Phd thesis.
- 36. Schepens 2020.** *Soyez acteur de votre santé*. Lannoo Meulenhoff-Belgium.
- 37. Stevens, Lowe, et Young 2004.** *Anatomie pathologique*. De Boeck Supérieur.
- 38. Touhari 2021.** « Influence du stress salin sur la composition minérale de la spiruline (Arthrospira platensis) ». PhD Thesis, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA.
- 39. Troudi 2017.** « Contribution à l'étude de l'amélioration de la qualité des eaux d'irrigation par la bioaccumulation minérale chez Arthrospira platensis (Spiruline) dans la région de Ouargla ». PhD Thesis, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA
- 40. Wafa et Loubna 2020.** « Etude des performances de certains aliments fabriqués localement sur la pigmentation et la croissance des poissons d'ornement, le cas de la carpe koi « Cyprinus carpio carpio » ».

Références bibliographiques

- 41. Yanni et al. 2020.** « Tracheomycosis biocontrol by PGPR: case of pea fusarium with *Pseudomonas fluorescens*. »