

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA
FACULTE DES SCIENCES**



**Mémoire de fin d'étude
En vue de l'obtention de diplôme de Master en sciences agronomiques
Option : phytopathologie**

Thème:

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

Présenté par :

- SKANDERI Mounia
- MAMMERI Abdelghani

Devant le jury composé de:

-M^{me} F.Z. TCHAKER	M.C.A	Univ. Médéa	Promotrice
-M^{me} F. SAFIDDINE	M.C.B	Univ. Médéa	Co-Promotrice
-M^{me} K. CHAOUATI	M.A.A	Univ. Médéa	Examinatrice
-M^{me} M. SLIFI	Doctorante	Univ. Bouira	Examinatrice

Année universitaire:2021/2022

RESUME

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

La culture du haricot vert *Phaseolus Vulgaris* exige l'apport d'importantes quantités de pesticides et fertilisants chimiques, ce qui peut compromettre la qualité nutritionnelle des grains produits et nuire à l'environnement. Cette étude visait à déterminer les effets biostimulants des défenses naturelle de *Spirulina platensis* sur le haricot.

La présente étude a pour l'objectif d'évaluer l'impact de différentes dilutions (5%, 10% , 15%) de l'extrait de la spiruline *Spirulina platensis* sur la croissance *Phaseolus Vulgaris* L et sur la sévérité puceron noire de la fève *Aphis fabae* Scopoli, (1763).

Les résultats montrent que les extraits de la spiruline *S. platensis* utilisés ont un effet remarquable sur la croissance des plantes traitées par rapport au témoin. L'activité stimulatrice se trouve influencer par la dose de l'extrait de la spiruline *Spirulina platensis*, et par conséquent elle paraît obéir à un gradient positif: dilution 5% < dilution 10% < dilution 15%. Cependant l'extrait de la spiruline *Spirulina platensis* apporté par absorption racinaire semble plus efficace que celui apporté par application foliaire.

Les résultats montrent que le biofertilisant a base l'extrait de la spiruline provoque une réduction considérable sur l'abondance d'*Aphis fabae* en comparaison avec le témoin. Par ailleurs, les résultats, montrent l'existence d'un effet comparable entre les extraits de la spiruline appliqué par voie foliaire et les extraits de la spiruline appliqué par voie racinaire.

Mots clés: Extrait; biostimulant; biofertilisant; *Phaseolus Vulgaris*; *Aphis fabae* Scopoli; *Spirulina platensis*.

Abstract

EFFECTS OF SPIRULINA PLATENSIS EXTRACTS ON THE NATURAL DEFENSES OF PLANTS

The cultivation of *Phaseolus Vulgaris* green beans requires the use of large quantities of pesticides and chemical fertilizers, which can compromise the nutritional quality of the beans produced and damage the environment. This study aimed to determine the biostimulant effects of the natural defenses of *Spirulina platensis* on the bean.

The present study aims to evaluate the impact of different dilutions (5%, 10%, 15%) of the spirulina extract *Spirulina platensis* on *Phaseolus Vulgaris* L growth and on the black aphid severity of the broad bean *Aphis fabae* Scopoli, (1763).

The results show that the extracts of spirulina *S. platensis* used have a remarkable effect on the growth of the treated plants compared to the control. The stimulatory activity is influenced by the dose of the spirulina extract *Spirulina platensis*, and therefore it appears to obey a positive gradient: 5% dilution < 10% dilution < 15% dilution. However, the extract of the spirulina *Spirulina platensis* provided by root absorption seems more effective than that provided by foliar application.

The results show that the biofertilizer based on the extract of spirulina causes a considerable reduction in the abundance of *Aphis fabae* in comparison with the control. In addition, the results show the existence of a comparable effect between the extracts of spirulina applied by foliar route and the extracts of spirulina applied by root route.

Keywords: Extract; biostimulant; biofertilizer; *Phaseolus vulgaris*; *Aphis fabae* Scopoli; *Spirulina platensis*.

الملخص

آثار مستخلصات سبيرولينا بلاتنسيس على الدفاعات الطبيعية للنباتات

تتطلب زراعة فاصوليا الخضراء *Phaseolus Vulgaris* استخدام كميات كبيرة من المبيدات الحشرية والأسمدة الكيماوية، والتي يمكن أن تضر بالجودة الغذائية للفاصوليا المنتجة وتضر بالبيئة أيضا. هدفت هذه الدراسة إلى تحديد تأثيرات المنشطات الحيوية للدفاعات الطبيعية للسبيرولينا *Spirulina platensis* على الفاصوليا الخضراء *Phaseolus Vulgaris*

تهدف الدراسة الحالية إلى تقييم تأثير مستخلصات مخففة و مختلفة (5% ، 10% ، 15%) من مستخلص سبيرولينا *Spirulina platensis* على نمو للفاصوليا الخضراء *Phaseolus Vulgaris* L وعلى شدة حشرة المن الأسود *Aphis fabae* Scopoli.

أظهرت النتائج أن مستخلصات سبيرولينا *Spirulina platensis* المستخدمة لها تأثير ملحوظ على نمو النباتات المعالجة مقارنة بمجموعة النباتات الغير المعالجة. يتأثر النشاط التحفيزي بجرعة مستخلص سبيرولينا *Spirulina platensis*، وبالتالي يبدو أنه يخضع لتدرج إيجابي: 5% مخفف > 10% مخفف > 15% مخفف. ومع ذلك، يبدو أن مستخلص سبيرولينا *Spirulina platensis* الذي يتم توفيره عن طريق الري أي (امتصاص الجذري) يبدو أكثر فعالية من تطبيقه على مستوى الأوراق فقط.

أظهرت النتائج أن الأسمدة الحيوية المعتمدة على مستخلص السبيرولينا *Spirulina platensis* تسبب انخفاضاً كبيراً في وفرة المن *Aphis fabae* مقارنة بالسيطرة.. بالإضافة إلى ذلك، أوضحت النتائج وجود تأثير مماثل بين مستخلصات سبيرولينا *Spirulina platensis* المطبقة على مستوى الأوراق ومستخلصات سبيرولينا *Spirulina platensis* المطبقة على مستوى الجذور.

الكلمات المفتاحية : مستخلصات ، المنشطات الحيوية للدفاعات الطبيعية ، الأسمدة الحيوية ، *Phaseolus Vulgaris* ، *Aphis fabae* Scopoli ، *Spirulina platensis*.

Remerciement

On remercie DIEU tout puissant pour la force et la bonne santé tout au long de notre recherche.

*Notre sincère gratitude va à notre promotrice, madame **TCHAKER Fatma Zohra**, maitre de conférences à l'université Yahia Fares de Médéa, pour son soutien total, son encouragement, sa patience, ses conseils et son dévouement dans la supervision de notre travail.*

*On remercie les membres du jury, Mme **Chaouati Karima** maitre assistante à l'université Yahia Fares de Médéa et Mme **Selifi Malika** doctorante à l'université de Bouira, pour avoir d'examiner ce travail.*

*On tient à exprimer notre profonde gratitude à Mr **Ainas Mahfoud** maitre de conférence à l'université Yahia Farès de Médéa pour sa disponibilité, son aide et ses précieux conseils.*

*On tient à remercier le président et tous les membres de l'association de l'environnement et du milieu vert particulièrement Mr **Hmaïmi Sahraoui**, Mr **Madjeber Foudil** et Mr **Benkhaoua Youcef** qui nous a aidés beaucoup dans ce travail.*

*On remercie Mme **Zemirline Amina** et Mlle **Abdelatif Amina** pour leur générosité et leur gentillesse.*

On n'oublie jamais à remercier les ingénieurs de laboratoire du département des sciences de la nature et de la vie pour ses conseils, sa gentillesse et son aide

Nos remerciements vont également à tous les enseignants du département des sciences de la nature et de la vie pour leur précieuse formation.

Que toutes les personnes qui ont aidé ou participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail, trouvent l'expression de notre haute considération

Que dieu vous bénisse tous.

Dédicaces

Je dédie ce travail en signe de respect, de reconnaissance et d'amour.

A ma chère maman pour son soutiens, son amour.

A mon cher père pour ses sacrifices et son aide.

A mon petit frère SOUHIL.

A mes grands parents et à toute la famille

Sans oublié mes camarades LAMIA, YOUSRA, NOUHA et AMIRA

A mes collègues de promotion Dilmi imene , Zammouri farouk.

Djaafar boukhalfa .

A toutes les personnes qui me connaissent de près ou de loin.

Skanderi Mounia

Dédicaces

Dieu merci

- Je dédie ce travail à Ceux qui sont les plus chers au monde, mes parents qui ont consacré leur vie et souffert pour veiller à mon bien-être.

- À mon père Abdenour, pour m'avoir soutenu moralement et matériellement jusqu'à ce jour, T'étais toujours mon vrai pilier toujours là pour m'encourager, toujours là pour me donner de la force merci d'avoir cru en moi. Mon vrai héros.

- À ma mère Samia, ma vraie source de motivation. Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect et mon amour pour toi. Merci d'avoir toujours été là pour moi depuis mon enfance, T'étais constante et forte, bienveillante et compréhensive. Ce travail est le fruit de tes efforts. Que Dieu te protège.

- À ma seule et unique Sœur, ma bien-aimé Amina, toujours disponible pour m'écouter à cœur ouvert pleine d'amour.

- À ma grand-mère, qui ne m'a jamais oublié dans ces prières. Que dieu t'accueille dans son vaste paradis (16/06/2022).

- À toute la famille Mammeri et Naroune.

- À tous mes amis, particulièrement : Farouk Zemmouri, Aisha Dahmani, Marouane Chiker , Chaima Bouyahia, Atef Mammeri , Sara Belhadj, Housseem Maaskri , Mohsene Benbabaali .

-À toute personne dont elle a une place dans mon cœur, que je connais, que j'estime et que j'aime.

Abdelghani mammeri

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	
ABSTRACT	
ملخص	
REMERCIEMENTS	
DÉDICACES	
TABLE DES MATÈRES	
LISTE DES FIGURES	
LISTE DES TABLEAUX	
INTRODUCTION GÉNÉRALE	13
CHAPITRE I. PLANTE HÔTE ET RAVAGEUR	
I.1. Généralité sur la plante hôte <i>Phaseolus vulgaris</i> L., 1753	16
I.1.1 importance économique	16
I.1.2 Répartition géographique	16
I.1.3 Position systématique	16
I.1.4 Description morphologique	17
I.1.4.1 Les racines	17
I.1.4.2 Tiges	17
I.1.4.3 Feuilles	17
I.1.4.4 Fleurs	17
I.1.4.5 Graine	18
I.1.4.6 Gousse	18
I.1.5 Cycle de développement de la plante	18
I.1.5.1 Phase de germination	18
I.1.5.2 Phase de croissance	18
I.1.5.3 Phase de floraison	18
I.1.5.4 Phase de maturation	18
I.1.6 Ennemis ravageurs et maladies de <i>Phaseolus vulgaris</i>	19
I.2. Généralité sur le puceron noire de la fève <i>Aphis fabae</i> Scopoli, 1763	19
I.2.1 Généralité	19
I.2.2 Systématique	20
I.2.3 Description morphologique	20
I.2.4 Cycle de vie	21
I.2.5 Plante hôte	22
I.2.6 Les dégâts	22
I.2.5.1 Dégât direct	22
I.2.5.2 Dégât indirect	22
I.2.7 La lutte	23
I.2.7.1 Lutte préventif	23
I.2.7.2 Lutte physique	23
I.2.7.3 Lutte chimique	24
I.2.7.4 Lutte biologique	24
CHAPITRE II. NUTRITION MINÉRALE DES PLANTES	
II.1. Qu'est ce que une nutrition végétale?	26
II.2. Généralité sur la nutrition minérale	28
II.2.1 Définition	28
II.2.2 Classification des éléments minéraux	28
II.2.2.1 Classification sur la base de la quantité d'éléments nutritifs nécessaires par la plante	28
II.2.2.2 Classification selon les fonctions biochimiques et métaboliques de l'élément dans la plante	30
II.2.2.3 Classification sur la base de la mobilité des éléments nutritifs	30

	dans le sol.....	
II.2.2.4	Classification sur la base de la mobilité des éléments nutritifs dans la plante.....	32
II.2.2.5	Classification sur la base de la propriété métallique des éléments nutritifs.....	32
II.2.2.6	Classification selon la fonction des éléments nutritifs essentiels dans la plante.....	32
	II.2.2.6.1 Fonction des Macro-éléments.....	33
	II.2.2.6.2 Fonction des Micro-éléments.....	34
II.2.3	Absorption des éléments minéraux.....	36
II.2.4	Système de transport des ions minéraux dans les plantes	37
II.2.5	Interaction entre les éléments minéraux	38
II.2.6	Effets de la nutrition sur la santé végétale.....	39
CHAPITRE III BIOFERTILISANTS		
III.1	Généralité sur les biofertilisants	41
III.1.1	Définition.....	41
III.1.2	Différents types des biofertilisants	42
	III.1.2.1 Biofertilisants à base de rhizobactéries favorisant la croissance des plantes.....	42
	III.1.2.2 Biofertilisants à base des bactéries solubilisatrices des éléments minéraux.....	43
	III.1.2.3 Biofertilisants à base des bactéries fixatrices d'azote.....	44
	III.1.2.3.1 Bactéries non-symbiotique: <i>Azotobacter</i>	44
	III.1.2.3.2 Bactéries symbiotique.....	44
III.2	Spiruline.....	46
	III.2.1 Taxonomie.....	46
	III.2.2 Morphologie et caractères généraux.....	47
	III.2.3 Cycle biologique.....	47
	III.2.4 Situation de la culture de spiruline dans le monde.....	48
	III.2.5 Composition de la spiruline.....	51
	III.2.6 Intérêts et domaine d'utilisation.....	52
	III.2.6.1 Domaine médicinale	53
	III.2.6.2 Domaine cosmétique	53
	III.2.6.3 Domaine agroalimentaire.....	53
	III.2.6.4 Domaine animale.....	54
	III.2.6.5 Domaine agricole.....	54
CHAPITRE IV MATERIEL ET METHODES		
IV.1	Objectif	56
IV.2	Matériel d'étude biologique.....	56
	IV.2.1. Obtention du matériel végétale.....	56
	IV.2.1.1. Présentation de la chambre de culture.....	56
	IV.2.1.2. Obtention des plantules du haricot.....	57
	IV.2.2. Obtention des populations infestantes du puceron noir de la fève <i>Aphis fabae</i>	58
	IV.2.3. Obtention du biofertilisant.....	59
	IV.2.3.1. Culture de la spiruline et ses conditions.....	59
	IV.2.3.2. Milieu de culture.....	60
	IV.2.3.3. Contrôle de l'état physiologique de la culture.....	63
IV.3	Méthodes d'étude.....	64
	IV.3.1. Préparation de l'extrait aqueux de spiruline <i>Spirulina platensis</i>	64
	IV.3.2. Dispositif expérimental et application des traitements.....	64
	IV.3.3. Estimation des paramètres morphologiques des plants du haricot.....	66

IV.3.4.	Evaluation de l'abondance des formes biologiques d' <i>Aphis fabae</i>	67
IV.3.5.	Estimation de la fécondité d' <i>Aphis fabae</i>	67
IV.3.6.	Estimation des paramètres démographiques d' <i>Aphis fabae</i>	67
IV.4	Analyse statistique	68
CHAPITRE V RESULTATS		
V.1.	Evaluation de l'effet de l'extrait de la spiruline <i>Spirulina platensis</i> sur les paramètres de croissance du haricot vert <i>Phaseolus vulgaris</i> L	70
V.1.1.	Evolution de l'effet de l'extrait de la spiruline sur la croissance cumulative des plantes du <i>Phaseolus vulgaris</i> L	70
V.1.2.	Evolution de l'effet des extraits de la spiruline sur la croissance racinaire du <i>Phaseolus vulgaris</i> L	73
V.1.3	Evaluation de l'effet des extraits de la spiruline sur le nombre des tiges secondaires du haricot vert	75
V.1.4	Evolution de l'effet des extraits de la spiruline sur la biomasse aérienne du <i>Phaseolus vulgaris</i> L	77
V.1.5	Evolution de l'effet des extraits de la spiruline sur la biomasse racinaire du <i>Phaseolus vulgaris</i> L	79
V.2	Effet des différents traitements à base de l'extrait de la spiruline sur la réduction des populations du puceron noir de la fève <i>Aphis fabae</i>	81
CHAPITRE VI DISCUSSION GÉNÉRALE		
VI.1	Evaluation de l'effet des extraits de la spiruline <i>Spirulina platensis</i> sur les paramètres de croissance du haricot vert <i>Phaseolus vulgaris</i>	86
VI.2	Evaluation de l'effet des extraits de la spiruline <i>Spirulina platensis</i> sur l'abondance du puceron noir de la fève <i>Aphis fabae</i>	87
CONCLUSION GÉNÉRALE		
REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE		

Liste des figures

Figure I.1	Cycle de vie de haricot vert.....	19
Figure I.2	Différentes formes d' <i>Aphis fabae</i>	21
Figure I.3	Cycle de vie du puceron noir de la fève <i>Aphis fabae</i>	22
Figure II.1.	Relations trophiques d'une plante avec son environnement.....	27
Figure II.2	Transport radial des éléments minéraux dans la racine par les voies apoplasmique et symplasmique.....	37
Figure II.3	Schéma des différents transports passifs et actifs au travers d'une membrane plasmique d'une cellule végétale.....	38
Figure III.1	Spiruline vue au microscope.....	47
Figure III.2.	Différents aspect de la spiruline.....	47
Figure III.3.	Cycle de vie de la spiruline.....	48
Figure III.4.	Carte des principaux lieux de production de spiruline dans le monde.....	49
Figure III.5.	Fermes à spiruline.....	50
Figure III.6.	Ferme à spiruline Tamanrasset, Algérie.....	51
Figure IV.1.	Présentation de la Serre de culture	56
Figure IV.2	Stérilisation du substrat.....	57
Figure IV.3.	Présentation de la Serre de culture.....	58
Figure IV.4.	Plante de haricot infesté par <i>Aphis fabae</i>	59
Figure IV.5.	Culture de la spiruline dans les conditions expérimentales.....	61
Figure IV.6.	Spiruline vue au microscope.....	63
Figure IV.7.	Protocole de la préparation de l'extrait de la spiruline.....	65
Figure. IV.8.	Dispositif expérimental des traitements appliqués.....	66
Figure. V.1.	Effet des différents modes d'application de l'extrait de la spiruline sur la croissance des plants du haricot <i>Phaseolus vulgaris</i> L.....	71
Figure. V.2	Evaluation de l'efficacité des différents modes d'application des extraits de la spiruline sur la croissance aérienne des plants du haricot vert.....	72
Figure. V.3.	Etude comparée de l'effet des extraits de la spiruline sur la croissance cumulative du haricot.....	73
Figure. V.4	Evaluation de l'efficacité des différents modes d'application des extraits de la spiruline sur la croissance souterraine des plants du haricot vert.....	74
Figure. V.5.	Etude comparée de l'effet des extraits de la spiruline sur la croissance souterraine du haricot.....	75
Figure. V.6.	Evaluation de l'efficacité des différents modes d'application des extraits de la spiruline sur le nombre des tiges secondaires du haricot vert.....	76
Figure. V.7.	Etude comparée de l'effet des extraits de la spiruline sur le nombre des tiges secondaires du haricot.....	77
Figure. V.8.	Evaluation de l'efficacité des différents modes d'application des extraits de la spiruline sur la biomasse aérienne des plants du haricot vert.....	78
Figure. V.9.	Etude comparée de l'effet des extraits de la spiruline sur la biomasse aérienne du haricot.....	79
Figure. V.10.	Evaluation de l'efficacité des différents modes d'application des extraits de la spiruline sur la biomasse souterraine des plants du haricot vert.....	80
Figure. V.11.	Etude comparée de l'effet des extraits de la spiruline sur la biomasse racinaire du haricot.....	81
Figure. V.12.	Evolution temporelle des abondances d' <i>Aphis fabae</i> sous l'effet des différents modes d'application des extraits de la spiruline.....	82
Figure. V.13.	Evaluation de l'efficacité des différents modes d'application des extraits de la spiruline sur la l'abondance d' <i>Aphis fabae</i>	83
Figure. V.14.	Etude comparée de l'effet des extraits de la spiruline sur l'abondance d' <i>Aphis fabae</i>	84

Liste des tableaux

Tableau III.1.	Composition de la spiruline	52
Tableau IV. 1	Composition chimique du milieu Zarrouk.....	62
Tableau IV.2.	Composition chimique de la solution A5.....	62
Tableau IV.3	Composition chimique de la solution B6.....	62

.

Introduction

GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'agriculture et les ressources agricoles sont les seuls facteurs de subsistance de l'homme depuis son évolution. La majorité de la population mondiale dépend de l'agriculture pour la nourriture, les aliments pour animaux et d'autres choses importantes (fibres, bois, gommes et produits secondaires à valeur médicinale) pour maintenir un mode de vie sain (Herve *et al.*, 2016; Kaur *et al.*, 2018 in Giri *et al.*, 2019). Conformément à la tendance démographique croissante, pour répondre aux besoins de la faim de la population croissante, les chercheurs, les scientifiques, les agriculteurs et les agro-industries doivent développer des méthodes adaptées pour une agriculture durable (Bharadwaj *et al.*, 2014; Singh *et al.*, 2014).

La production intégrée en agriculture durable vise à améliorer l'efficacité des intrants biologiques à travers des formulations prolongeant la remanence au champ ou en incorporant des produits synergiques. Ces derniers, étant eux-mêmes non toxiques aux doses utilisées, augmentent de manière conséquente l'action protectrice de la viabilité des cultures (Chaichi, 2018). Dans ce contexte, les molécules bioactives (biopesticides, biostimulateur, biofertilisants) occupent une place de choix car ils se prêtent souvent à la production de masse requise pour l'industrie (Bonnemaine *et al.* 2003). Le biofertilisant est un mélange de nutriments spécifiques, ce qui pourrait être utile pour améliorer la production agricole, tandis que d'un autre côté, il protège ou maintient les conditions environnementales. Les progrès scientifiques pour la production de biofertilisants ont apporté des attractions impressionnantes en raison de leur implication dans la production alimentaire et le maintien de la protection de l'environnement (Giri *et al.*, 2019).

Selon Khan *et al.* (2009 in Aghofack-Nguemezi *et al.*, 2015), 15 millions de tonnes d'algues sont produits annuellement et une importante partie est utilisée comme supplément nutritif ou comme régulateurs de croissance des végétaux, engrais ou pesticides. Parmi les algues, les cyanobactéries ont un potentiel important en tant que biofertilisants. Elles présentent un grand intérêt scientifique et agronomique, car elles jouent un rôle important dans l'amélioration de la qualité du sol et le développement des plantes (Fao, 1981). Parmi les cyanobactéries les plus cultivées la spiruline *Spirulina Platensis* représente plus de 50 % de la production mondiale (Vo *et al.*, 2015). Elle est riche en protéines, en substances minérales « macro et micro-éléments » qui sont nécessaires à la croissance et au développement des plantes, et contiennent également divers acides aminés, vitamines, régulateurs de croissance comme les auxines, les gibbérellines et les cytokinines (Bluden *et al.*, 1997; Belay *et al.*, 1993; AroraSoni *et al.*, 2017). Plusieurs auteurs ont révélé les avantages d'extraits de la spiruline sur les plantes tel que l'amélioration de la performance des cultures et le rendement et l'amélioration de la résistance au stress biotique et abiotique (Jean *et al.*, 2015).

Afin d'apporter une réponse à cette question, et dans la perspective de contribuer à une agriculture respectueuse de l'environnement, notre choix s'est porté sur l'étude de l'effet d'un biofertilisant sur la culture *Phaseolus vulgaris* L.,(1753).

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'effet de stimulateur de défense naturelle d'un biofertilisant à base d'extrait de *Spirulina Platensis* sur la croissance du haricot *Phaseolus vulgaris* L.,(1753) et ses retombées sur l'abondance et les paramètres démographiques du puceron noir *Aphis fabae* Scopoli, (1763).

Chapitre 1

CHAPITRE I.

PLANTE HOTE ET RAVAGEUR

(*PHASEOLUS VULGARIS* L., 1753/ *APHIS FABAE* SCOPOLI, 1763)

I.1. Généralité sur la plante hôte *Phaseolus vulgaris* L., 1753

I.1.1.Importance économique

Le haricot représente une source de revenus importante pour des millions de personnes notamment dans les pays en voie de développement. Il constitue la principale légumineuse alimentaire de plus de 300 millions de personnes en Amérique latine, en Afrique centrale et en Afrique de l'Est (Silue *et al.*, 2010 in Fetnassi, 2015). Durant la période allant de 1994 à 2004 la production mondiale de haricot sec a connu des fluctuations mais la tendance est légèrement à la hausse. Pendant cette période, la production est variée d'un plancher de 15.5 millions de tonnes à un sommet de 18.9 millions de tonnes (FAO, 2004 in Kassemi, 2006).

D'après le ministère de l'agriculture et du développement rural, l'Algérie a mis en œuvre, un plan d'action visant l'augmentation de la production agricole et ceci par l'intensification de la culture des céréales et des légumineuses (Hamdani, 2012). La production moyenne de l'haricot en l'Algérie a été estimée à 0.72 t/ha avec une surface totale d'environ 1616 hectares en 2009.

I.1.2. Répartition géographique

L'haricot est un fruit d'une plante originaire d'Amérique centrale et d'Amérique du sud. Le mot « haricot » désigne à la fois le fruit, la graine et la plante qui les produit. Il est dérivé de « ayacolt », nom de ce légume en nahuatl, langue parlée par les aztèques (Fortin., 1996). L'haricot, connu sous l'appellation scientifique *Phaseolus vulgaris* L. est une légumineuse largement cultivée et consommée dans le monde (Kaplan, 1981 in Berrichi et Negaza, 2019).

Les haricots du genre *Phaseolus*, sont originaires d'Amérique centrale et d'Amérique du Sud. Cette plante a été domestiquée séparément en Amérique centrale (Mexique et Guatemala) et dans les Andes d'Amérique du Sud (principalement le Pérou) pendant plus de 5000 ans, ensuite elle a été introduite en Europe au début du XVI^e siècle, mais il demeurera pendant de nombreuses années consommé en grains. Au XVIII^e siècle, ce sont les Italiens qui commencèrent à manger les gousses des haricots, cueillies avant la maturité, et ce sous forme de légume (Baudouin *et al.*, 2001).

I.1.3. Position systématique

Selon Guignard (1998), la position systématique du haricot est la suivante :

- Règne : : Végétal.
- Embranchement : : Spermaphytes.-
- Sous embranchement : : Angiospermes.
- Classe : : Dicotylédones.
- Ordre : : Fabales.
- Famille : : Fabacées.
- Genre : : Phaseolus.
- Espèce : : *Phaseolus vulgaris* L., 1753

I.1.4. Description morphologique

L'haricot *Phaseolus vulgaris* L., 1753 possède un nombre de chromosome égal à $2n = 22$ (GEPTS, 1990).

I.1.4.1. Les racines

Système racinaire pivotant et profond qui peut descendre jusqu'à 1,20 m. On trouve le plus grand nombre de racines entre 0,20 m et 0,25 m de profondeur, sur un diamètre de 0,50 m autour de la tige. Des nodosités peuvent se former sur les radicelles, mais on ne peut pas considérer le haricot comme une plante enrichissant le sol en azote car il demeure trop peu de temps en terre (Barreto, 1983 *in* Benchamma et Bouacha, 2020).

I.1.4.2. Tiges

Elles sont plus ou moins longues suivant les variétés. Les grandes tiges peuvent atteindre 2 à 3 m de long, c'est le "haricot à rames". Les tiges courtes ne dépassent guère 30 à 40 cm de longueur et le haricot ayant de telles tiges est appelé "haricot nain" (Dupont et Guignard, 1989 *in* Benchamma et Bouacha).

I.1.4.3. Feuilles

Les feuilles sont composées de 3 folioles (trifoliées) ovales se terminant en pointe, mesurant de 7.5 à 14 cm. Les deux premières feuilles au sommet de l'hypocotyle sont simples. Les feuilles suivantes sont composées et disposées de façon alterne (Kroll, 2000 *in* Mansouri, 2020).

I.1.4.4. Fleurs

La famille Fabaceae est caractérisée par une architecture qu'elle offre des fleurs sous forme de grappe auxiliaires courtes comptant de 4 à 10 fleurs (Chaux et Foury, 1994). Chaque fleur a environ 2 cm de long et de couleur très variée ; rose, blanche,

violette, rouge (Bell, 1994). Les fleurs d'haricot vert sont de forme papilionacées, et comprennent : 5 sépales, 2 pétales, 9 étamines soudées par leur base et une étamine libre, un ovaire avec une loge renfermant de 4 à 8 ovules.

I.1.4.5. Graines

Elles sont réniformes, arrondies à ovales plus ou moins allongées. Le tégument peut être noir, blanc ou revêtu de différentes nuances de jaune, brun, rouge, ou rose selon les variétés (Chaux et Foury, 1994).

I.1.4.6. Gousses

Selon Guignard (1998), les gousses sont allongées, leur couleur varie selon les cultivars, du vert pâle au jaune au vert foncé. Elles sont parfois tachées de couleurs diverses à maturité et peuvent être renforcées par des fibres ligneuses formant un parchemin sur les côtés.

I.1.5. Cycle de développement de la plante

I.1.5.1. Phase de germination

Les graines lèvent en 4 à 8 jours suivant la température. Elles doivent toutes être sorties de terre au bout de 8 jours, les cotylédons sortis du sol, se sont ouverts et la première paire de feuilles apparaît (Hubert, 1978).

I.1.5.2. Phase de croissance

Trois à quatre jours après la levée, les cotylédons commencent à se faner (Pitrat et Foury, 2003), cinq à six jours après la levée apparaît la première feuille trifoliolée, cinq à six jours après l'apparition de la première feuille trifoliolée apparaît la deuxième. Au bout d'un mois, le pied de haricot possède une dizaine de feuilles trifoliolées et il a atteint sa hauteur définitive de 30 à 40 cm pour les variétés naines (Dupont et Guignard, 1989).

I.1.5.3. Phase de floraison

Elle débute 3 semaines à 1 mois environ après le semis. Elle dure 1 mois à 1 mois et demi suivant les conditions climatiques. La jeune gousse met une dizaine de jours environ pour atteindre sa taille définitive (Lecomte, 1997).

I.1.5.4. Phase de maturation

Une fois la taille définitive atteinte, les graines se forment en 15-20 jours. Il faut attendre encore 20 à 30 jours pour que les gousses s'ouvrent d'elles-mêmes, les graines

étant mûres. Le cycle végétatif complet du haricot varie entre 75 et 130 jours (Lecomte, 1997).

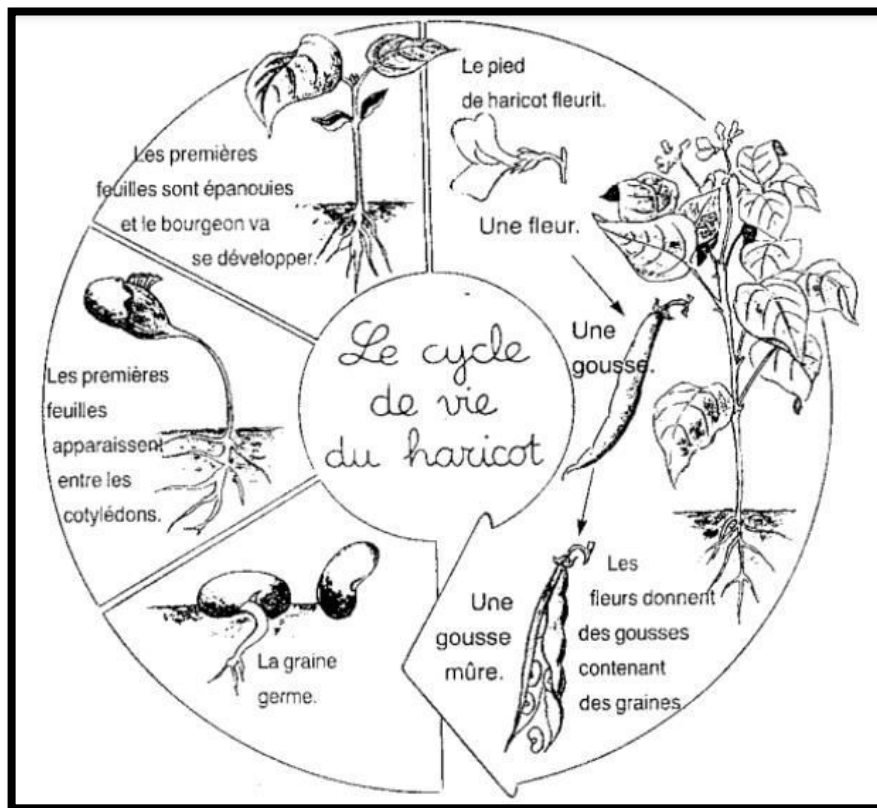


Figure I.1. Cycle de vie de haricot vert (Caburet et Hekimian, 2003 in Chekkal et Derradji, 2015).

I.1.6. Ennemis ravageurs et maladies de *Phaseolus vulgaris*

Les cultures de haricots sont sujettes à de nombreuses attaques de ravageurs et maladies qui peuvent entraîner d'importants dégâts en l'absence de moyens de lutte appropriés. Selon les recherches, en Afrique tropicale plus de 50 % de la production est perdue chaque année suite aux attaques des bio-agresseurs (Belaadi, 2014; Chekkal, 2015).

Ces maladies et ravageurs sont extrêmement variés dont les plus importants sont: Flétrissement bactérien, Rouille; maladies à Sclérose; Acarien jaune; Pyrale du maïs *Ostrinia nubilalis*; Puceron des racines *Trifidaphis phaseoli*; Puceron noir de la fève *Aphis fabae* ;.....) (Hamdani., 2012; Tahri, 2018).

I.2. Généralité sur le puceron noire de la fève *Aphis fabae* Scopoli, 1763.

I.2.1. Généralité

Aphis fabae est l'une des espèces les plus polyphages qui soient, elle peut évoluer sur plus de 200 espèces de plantes, parmi lesquelles la betterave, la fève, la féverole, le

haricot, la pomme de terre, la carotte, l'artichaut, le tabac, ainsi que certaines cultures florales et ornementales (Fraval, 2006).

I.2.2. Systématique

Remaudiere et Remaudiere (1997), ont classé *Aphis fabae* comme suit :

- Règne : Animal
- Embranchement : Arthropodes
- Sous embranchement : Mandibulates
- Classe : Insectes
- Sous-classe : Ptérygotes
- Section : Neoptères
- Super ordre : Hémiptéroïdes
- Ordre : Homoptères
- Superfamille : Aphidoidea
- Genre : *Aphis*
- Espèces : *Aphis fabae* Scopoli, 1763

I.2.3. Description morphologique

L'**adulte aptère d'*A. fabae*** mesure entre 2 et 2,4 mm (Benoufella-Kitous, 2005 *in* Ben Hamza et Laib, 2020). Elle est de couleur vert olive foncé à noir mat et recouverte d'une forte sécrétion cireuse blanche (Hein *et al.*, 2005 *in* Ben Hamza et Laib, 2020). Les cornicules sont coniques nettement plus longues que la cauda. Ce dernier est digitiforme et trapu.

La **forme ailée** est plus allongée que la forme aptère (Hulle *et al.*, 1999). Elle est de couleur sombre, avec des antennes courtes et qui représentent environ les deux tiers de la longueur du corps (Hulle *et al.* 1999). D'après Leclant (1999), le troisième article antennaire porte un grand nombre de sensoria secondaires disposés irrégulièrement. Parfois il existe quelques sensoria sur le quatrième article antennaire. L'abdomen de l'ailé est souvent orné de bandes transversales irrégulières et des clérites marginaux de couleur sombre. Les cornicules sont noires. La cauda est noire et arrondie à son extrémité (Benoufella-Kitous, 2005 *in* Ben Hamza et Laib, 2020).

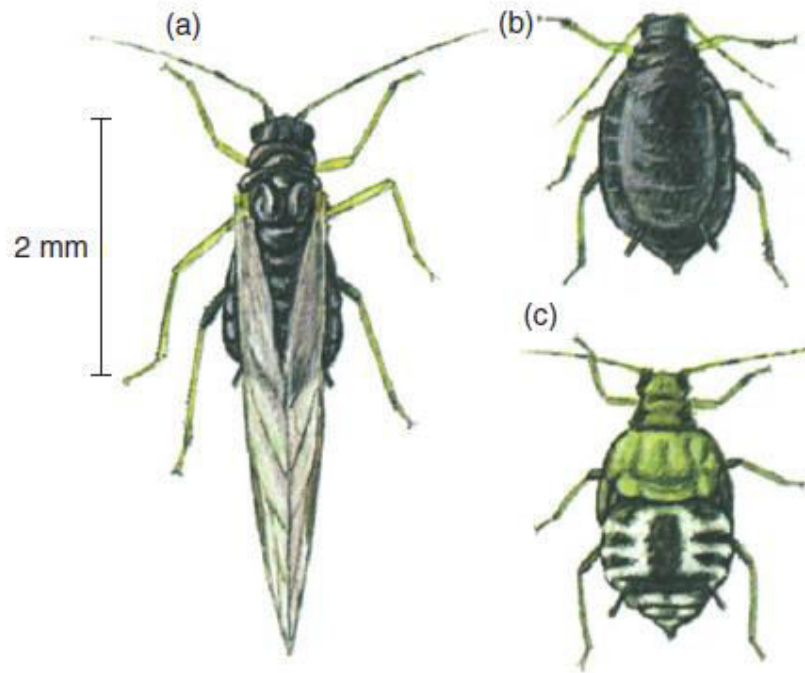


Figure I.2. Différentes formes d'*Aphis fabae* (Van Emden, 2013)

a) Adulte ailé b) Adulte aptère c) nymphe

I.2.4. Cycle de vie

Aphis fabae est dioïque (Le Bohec *et al.*, 1981; Hullé *et al.*, 1999). Il alterne son développement entre son hôte primaire, en général le Fusain, et ses hôtes secondaires, des plantes herbacées appartenant à de très nombreuses familles botaniques. Dès le mois de mars, après l'éclosion des œufs d'hiver, plusieurs générations parthénogénétiques se développent sur l'hôte primaire. La proportion d'ailés augmente alors au sein des colonies. Les premiers ailés s'observent au cours du mois d'avril. Ces individus seront à l'origine de colonies en manchons parfois très denses sur les plantes hôtes secondaires sauvages et cultivées. Les ailés impliqués dans la reproduction sexuée apparaissent à l'automne et regagnent l'hôte primaire. La fécondation et la ponte intervenant au courant du mois d'octobre. La reproduction sexuée n'est pas toujours obligatoire chez ce puceron.

Dans les régions à climat doux, des populations peuvent de maintenir tout l'hiver sur des hôtes secondaires en continuant à se multiplier par parthénogenèse (Hullé *et al.*, 1999).

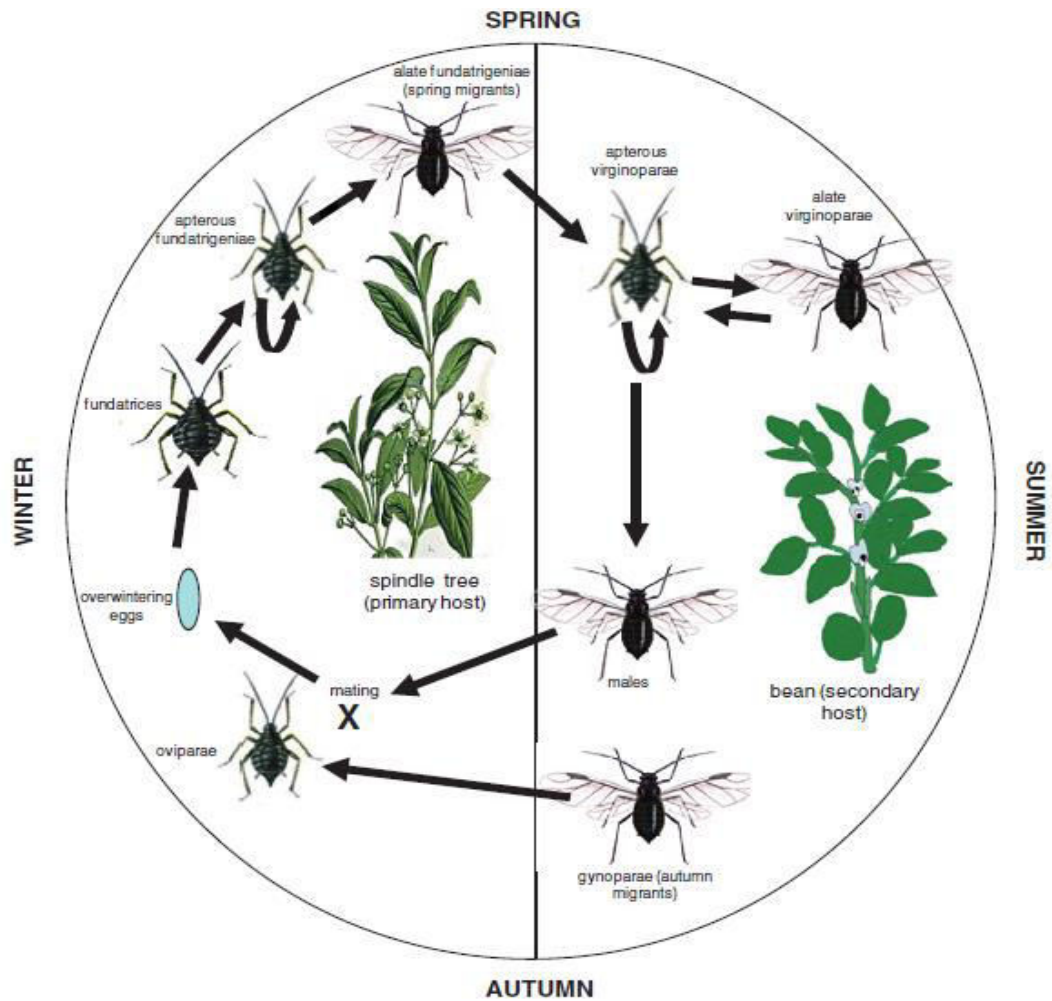


Figure I.3. Cycle de vie du puceron noir de la fève *Aphis fabae* (Van Emden, 2013).
Les flèches en forme de U indiquent quand il y a plusieurs générations aptères avant la génération ailée suivante.

I.2.5. plante hôte

Les pucerons se rencontrent sur une très large gamme de plantes spontanées ou cultivées, sur celles cultivées en particulier sur la fève, le pois, le haricot... (Lekhal et Meherhera, 2017).

I.2.6. Dégâts

La présence de milliers d'individus sur une même plante peut causer des dégâts importants.

I.2.6.1. Dégât direct

Les pucerons causent d'importants dommages cultureux en s'alimentant directement dans les éléments criblés du phloème, dans lesquels ils prélèvent la sève phloémienne riche en sucres, composés azotés et autres nutriments essentiels à leurs

développement et reproduction (Dinant et *al.*, 2010). La croissance de la plante s'en trouve altérée et les fleurs avortent sous l'effet de la salive.

I.2.6.2. Dégât indirect

Les pucerons rejettent une substance épaisse et collante par le système digestif appelée le miellat. Ce composé déposé sur les feuilles et au pied de la plante hôte est riche en sucre et en acides aminés (Leroy et *al.*, 2009). La production du miellat provoque des brûlures sur le feuillage et favorisent le développement de la fumagine (Hullé et *al.*, 1999).

Les pucerons sont responsables de dégâts indirects assez importants en transmettant plus de 30 virus pathogènes (Blackman et Eastop, 2007; Harmel et *al.*, 2010 ; Akello et Sikora, 2012). Les virus affectent les processus physiologiques de la plante, en diminuant le taux de photosynthèse, en réduisant la teneur en chlorophylle (jaunisse) et en augmentant les taux de respiration (Radwan et *al.*, 2008).

I.2.7. La lutte

I.2.7.1. Lutte préventif

La prévention demeure le meilleur moyen de lutter contre les ravageurs. Elle se base sur les différentes pratiques culturales et l'entretien de la culture tels que la détermination d'une date de semis et récolte adéquate, l'enfouissement pendant l'hiver des plantes ayant reçu des œufs d'hiver, la destruction par désherbages ou binages des plantes sauvages susceptibles d'héberger des espèces nuisibles aux plantes cultivées au début du printemps, la rotation des cultures avec une plante qui serait attrayante pour les pucerons et les associations culturales (Lambert, 2005). Selon Ould El Hadj (2004), l'association d'une plante hôte avec une plante compagne émettant des composés volatils différents va permettre de masquer ou d'altérer l'odeur de la plante hôte, ce qui va perturber sa localisation par les pucerons.

I.2.7.2. Lutte physique

Elle consiste à produire une augmentation de la température qui perturbe les pucerons mais ne nuit pas à la plante. Le choc thermique qu'on provoque par la fermeture des ouvrants de la serre, pendant quelques heures (3h) est très efficace. Dans ces conditions il peut y avoir une élévation de température jusqu'à 45° C qui peut entraîner la mort de près de 90% des populations des stades jeunes de pucerons sans porter préjudice à la culture (Rabasse, 1979, Jourdhueil, 1979 in Abdelkader et ouadah, 2016).

I.2.7.3. Lutte chimique

Les insecticides utilisés sont les organophosphorés, les carbamates et les pyrèthrinoïdes de synthèse et il est apparu une nouvelle famille de produits, les chloronicotiniles qui présentent la particularité d'être très fortement systémiques (Dedryver, 2007). Cependant, les insecticides présentent des inconvénients : ils coûtent chers, nuisent à l'écosystème et à l'environnement et tuent les insectes auxiliaires, de plus, les pucerons peuvent développer des résistances aux différentes molécules chimiques utilisées (Dogimont et *al.*, 2010).

I.2.7.4. Lute biologique

La lutte biologique peut être effectuée aussi avec des insecticides naturels, à base de pyrèthre, molécule issue de la plante de chrysanthème *Chrysanthemum cinerariifolium*, qui agit par contact en paralysant les pucerons. Le traitement se fait par pulvérisation de l'ensemble du feuillage et l'opération est répétée jusqu'à mort totale des pucerons (Lambert, 2005).

Chapitre 2

CHAPITRE II.

NUTRITION MINERALE DES PLANTES

-Introduction

Les plantes terrestres sont organisées en tiges, feuilles et racines. Les tiges et les feuilles baignent dans l'atmosphère ambiante où elles prélèvent le dioxyde de carbone (CO₂) et captent l'énergie du rayonnement solaire pour réaliser la photosynthèse. Les racines plongent dans le sol d'où elles tirent l'eau et les éléments minéraux nécessaires au métabolisme et à l'élaboration des molécules du monde végétal (Morot-Gaudry *et al.*, 2017).

La nutrition des plantes est une branche importante de la phytologie, elle est étroitement liée à la biochimie, à l'anatomie végétale et à la chimie des sols. Il traite des aspects physiologiques des éléments nutritifs des plantes. C'est une merveille de l'univers qu'un organisme vivant puisse absorber des éléments et être capable d'utiliser ces éléments pour leur croissance et leur développement. Les éléments minéraux et non minéraux sont absorbés par les plantes et sont incorporés dans l'organe par divers processus métaboliques. Le processus d'acquisition des éléments et leur utilisation dans le corps végétal est très important pour l'agriculture, ce qui ouvre un sujet, connu sous le nom de nutrition des plantes. Le sujet de la nutrition des plantes est très important pour assurer un système agricole durable (Baset Mia, 2015).

II.1. Qu'est ce que une nutrition végétale?

La nutrition végétale peut se définir comme l'ensemble des relations entre (Figure II.1.) (Morot-Gaudry *et al.*, 2017):

- i.* La tige feuillée et l'atmosphère dont la principale activité est la photosynthèse (synthèse de matière organique à partir du CO₂ grâce à l'énergie lumineuse);
- ii.* Le système racinaire et le sol dont la principale activité est l'absorption d'eau et de sels minéraux;
- iii.* Et la relation entre ces deux compartiments grâce à la présence et au fonctionnement de deux systèmes de circulation, le phloème qui transfère à toutes les parties de la plante les substances synthétisées (sève élaborée par les feuilles) et le xylème qui irrigue toute la plante avec l'eau et les sels minéraux absorbés par les racines.

Il existe différents types de nutrition pour les plantes (Gantet et Verger, 2002; Taiz *et al.*, 2015; Morot-Gaudry *et al.*, 2017):

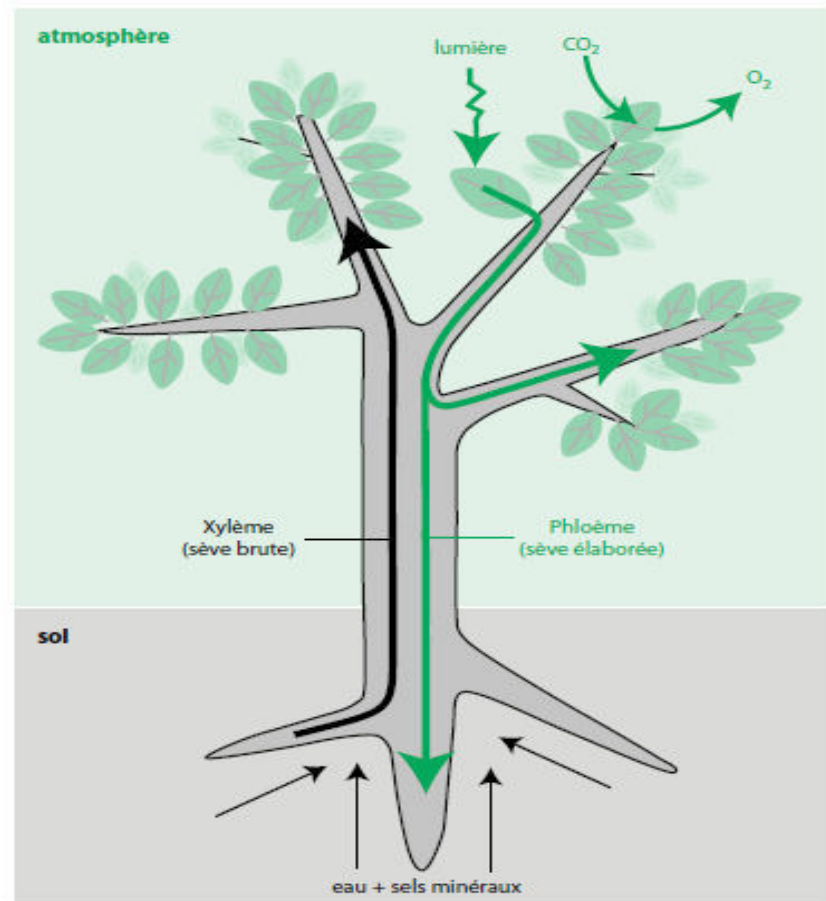


Figure II.1. Relations trophiques d'une plante avec son environnement (Morot-Gaudry *et al.*, 2017).

i. Nutrition hydrique

De toutes les ressources dont les plantes ont besoin pour pousser et fonctionner, l'eau est la plus abondante et pourtant souvent la plus limitante. L'eau est pondéralement le constituant le plus important des tissus physiologiquement très actifs et c'est pour cela que les possibilités d'alimentation en eau déterminent largement la répartition des végétaux à la surface du globe : la végétation est abondante sur les terres bien arrosées, mais pratiquement absente des terres peu ou pas du tout arrosées (déserts). La pratique de l'irrigation des cultures reflète le fait que l'eau est une ressource clé limitant la productivité agricole. La disponibilité de l'eau limite également la productivité des écosystèmes naturels (Taiz *et al.*, 2015, Morot-Gaudry *et al.*, 2017).

ii. Nutrition carbonée

La nutrition carbonée est caractérisée par des échanges dans les deux sens, entre l'atmosphère et les organes du végétal (Chaichi, 2011). La nutrition carbonée des végétaux fait intervenir un ensemble de réactions métaboliques originales, que l'on ne retrouve que chez quelques bactéries : la photosynthèse. En effet, la photosynthèse est un processus physiologique par lequel les végétaux verts (chlorophylliens) sont capables de capter l'énergie lumineuse et de la transformer en énergie chimique (ATP et pouvoir réducteur

NADPH, H⁺) afin de réaliser la nutrition carbonée à partir du CO₂ atmosphérique, de (bi)carbonate, et de l'eau ... Ce processus est accompagné d'un dégagement de dioxygène O₂ (Gantet et Verger, 2002; Taiz *et al.*, 2015).

iii. Nutrition minérale

La nutrition minérale comprend l'apport, l'absorption et l'utilisation des nutriments essentiels à la croissance et au rendement des plantes cultivées (Fageria *et al.*, 2011). Elle concerne tous les éléments chimiques autres que C, O, H et se caractérise par une incorporation plus ou moins complète de ces corps à la substance du végétal: tant que celui-ci reste vivant, des sorties peuvent exister mais elles restent faibles par rapport aux entrées.

II.2. Généralité sur la nutrition minérale

II.2.1. Définition

La nutrition minérale de la plante intègre l'ensemble des mécanismes impliqués dans le prélèvement par les racines, le transport, le stockage et l'utilisation des ions minéraux nécessaires au métabolisme et à la croissance de la plante. Sur le plan fondamental, la fonction de nutrition minérale représente une originalité majeure du monde végétal. Dans les écosystèmes terrestres, les plantes représentent la principale voie d'entrée des ions minéraux nutritifs dans la biosphère et les chaînes alimentaires qui conduisent à l'homme. Autrement dit, ces ions quittent le monde minéral du sol pour entrer dans le monde vivant au moment précis où ils sont prélevés par les systèmes d'absorption de la membrane plasmique d'une cellule racinaire. Sur le plan appliqué, les connaissances acquises dans ce domaine sont utilisés pour gérer au mieux la fertilisation des cultures, de façon rationnelle sur le plan socio-économique et durable sur le plan écologique (Morot-Gaudry *et al.*, 2012).

II.2.2. Classification des éléments minéraux

Les éléments minéraux nécessaires à la plante sont classés selon leur implication dans les différentes fonctions physiologiques intervenant dans la croissance et le développement de la plante. Selon Baset Mia (2015) et Hamdani (2020), il existe différentes bases de classification:

II.2.2.1. Classification sur la base de la quantité d'éléments nutritifs nécessaires par la plante

On peut diviser les nutriments en 2 grands groupes (Hamdani, 2020): essentielles et non essentielles.

i. Les éléments essentiels: Pour qu'un élément minéral puisse être considéré comme essentiel pour une plante, il doit avoir les trois conditions suivantes (Hamdani, 2020):

- o L'élément doit être indispensable pour la croissance et le développement de la plante de telle manière que son absence empêche le déroulement normal du cycle de vie de la plante;
- o Que la plante nécessite spécifiquement cet élément et que son déficit ne peut être corrigé par l'addition d'un autre élément (irremplaçable);
- o L'élément doit être directement impliqué dans la nutrition des plantes, c'est-à-dire que son action ne peut être indirecte comme par exemple favoriser l'absorption d'un élément ou diminuer les effets toxiques d'un autre élément... ect.

Les éléments essentiels eux même peuvent être classés en 3 classes (Jones *et al.*, 2012; Hamdani, 2020):

- **Les nutriments basiques:** sont le carbone C, l'oxygène O et l'hydrogène H. Ces éléments sont abondants dans la nature et constituent environ 96 % de la matière sèche totale de plante dont le carbone et l'oxygène constituent 45 % chacun et l'hydrogène 6 % du corps végétal sur la base de la matière sèche (Baset Mia, 2015). Ces éléments sont des **macronutriments indispensables** à la vie de la plante mais ces derniers sont épuisés directement de l'eau et l'air. Il est à noter que le (C) provient de l'air atmosphérique sous forme de dioxyde de carbone (CO₂); tandis que l'H et l'O proviennent de l'eau (H₂O) et qui sont les principaux constituants de la fraction glucidique de la plante (Jones *et al.*, 2012, De Mello Prado, 2021).

- **Les macroéléments (macronutriment ou nutriments majeurs):** Ce groupe est constitué des minéraux les plus abondants dans les cellules végétales et requis en grandes quantités par la plante afin d'assurer sa croissance et son développement nommés macroéléments. Ils sont présents dans la plante en quantités élevées qui peut varier de 0,1% à 4% de la matière sèche. Au nombre de ces minéraux, on retrouve : l'azote, le potassium, le phosphore, le calcium, le magnésium et le soufre (Baset Mia, 2015; Hamdani, 2020).

On distingue deux catégories **de macroéléments** (Jones *et al.*, 2012; Mia, 2015; Hamdani, 2020):

- o **Les macroéléments primaires:** tels que l'azote (N), le phosphore (P), et le potassium (K) dont les plantes ont besoin en abondance et à des intervalles réguliers. Ils sont souvent appelés les éléments fertilisants car ils sont les principaux éléments qui forment les engrais chimiques.

- o **les macro-éléments secondaires:** tels que le soufre (S), le magnésium(Mg) et le calcium(Ca) dont la plante ne les utilise qu'en petites quantités et à certain moment de la vie.

• **Les micro-éléments (micronutriments ou oligoéléments) :** sont les éléments essentiels dont les plantes ont besoin pour des concentrations relativement faibles. Les micros éléments jouent un rôle important dans la santé et la croissance de la plante. Ils comprennent le bore(B), le cuivre(Cu), le fer(Fe), le manganèse(Mn), le molybdène(Mo), le sodium (Na), le chlore (Cl), et le zinc(Zn) (Wiedenhoeft, 2006). Les quantités d'oligoéléments assimilées par les plantes sont sous forme de traces mais leur rôle dans la nutrition globale de la plante est très important. Ils sont présents dans la plante en quantité très faible qui ne dépasse pas 0,01% de la matière sèche. En grandes cultures, le Fer, le Cuivre, le Manganèse, le Zinc, le Bore et le Molybdène sont les oligos les plus cités comme pouvant devenir facteurs limitant le développement normal des principales productions (Hamdani, 2020).

ii. Les éléments non essentiels: les éléments non essentiels (facultatifs), on les divise en 2 groupes (Hamdani, 2020):

- Eléments utiles ou essentielles pour quelques plantes seulement (Na, Si, Co, Al, Se, Ti)
- Eléments toxique: ce sont ceux qui inhibent la croissance et le développement des plantes, leur action peut être en relation avec un blocage d'un système enzymatique, en tenant compte que l'élément minéral ajouté en concentration élevée inhibe la croissance et le développement: il devient toxique.

II.2.2.2. Classification selon les fonctions biochimiques et métaboliques de l'élément dans la plante

Les éléments nutritifs peuvent être classés en quatre groupes en fonction de leurs propriétés biochimiques et métaboliques (Tableau II.1.) (Baset Mia, 2015; Hamdani, 2020).

II.2.2.3. Classification sur la base de la mobilité des éléments nutritifs dans le sol

Selon le degré de mobilité dans le sol, les éléments nutritifs sont classes en trois groupes (Baset Mia, 2015):

i. Nutriments mobiles: Les nutriments de ce groupe sont très mobiles dans le système pédologique, très solubles et non adsorbés sur les complexes argileux. Il y a un risque de perdre ces éléments par lessivage lorsqu'ils sont appliqués dans le sol comme engrais chimique (Exemple : NO_3^- , SO_4^{2-} , BO_3^{2-} , Cl^- et Mn^{2+}).

ii. Nutriments moins mobiles: Ils sont solubles, adsorbés par le complexe argileux et leur mobilité est limité dans une certaine mesure. La perte par lessivage est minimale lorsqu'ils sont appliqués dans le sol comme engrais chimique (Exemple: NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cu^{2+}).

iii. Nutriments immobiles: Ces ions nutritifs sont très réactifs et se fixent dans le sol sous des conditions acides et basiques (Exemple : H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} , Zn^{2+}).

Tableau II.1. Groupe d'élément fonctionnel selon le comportement physiologique et biochimique (Baset Mia, 2015; Hamdani, 2020).

Groupe	Éléments minéraux	Formes ioniques absorbées par les plantes	Fonctions biochimiques
1	Carbone (C) Hydrogène (H) Oxygène (O) Azote (N) Soufre (S)	Sous forme de: CO_2 , HCO_3^- , H_2O , O_2 , NO_3^- , NH_4^+ , N_2 , SO_4^{2-} , SO_2 . -Les ions à partir de la solution du sol, les gaz de l'atmosphère.	- Principaux constituants de la matière organique -Implication dans les processus enzymatiques. -Assimilation par des processus de décarboxylation et d'oxydoréduction
2	Phosphore (P) Bore (B) Silicium (Si)	Sous forme de: H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} , BO_3^{2-} .	-Estérification avec des groupes alcool. -Les esters de phosphates sont impliqués dans les réactions de transfert énergétique (formation d'ATP).
3	Potassium (K) Sodium (Na) Magnésium (Mg) Calcium (Ca) Chlore (Cl) Manganèse (Mn).	Sous forme d'ions à partir de la solution du sol K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Mn^{2+} , Cl^-	-Fonction non spécifique sur le potentiel osmotique. -Réactions plus spécifiques sur les activations enzymatiques -ontage réactionnels. -Balance anionique -Contrôle de la perméabilité membranaire et des potentiels électriques. Ils font l'équilibre avec d'autres anions dans le cytosol et vacuole.
4	Fer (Fe), Cuivre (Cu), Zinc (Zn), Molybdène (Mo)	Sous forme d'ions ou de chélates à partir de la solution du sol. Fe-EDTA , Cu^{2+} , Zn^{2+} , MoO_4^{2-}	Majoritairement présents sous forme chélates dans les groupes prosthétiques (non protéique) -Permettent le transport d'électron par changement de valence Une réaction d'oxydoréduction ou Réactions redox (constituants des cytochromes, oxydases...).

II.2.2.4. Classification sur la base de la mobilité des éléments nutritifs dans la plante

Certains éléments nutritifs sont capables de se déplacer d'un organe à un autre tandis que d'autres sont fixées dans le même organe. Les éléments nutritifs mobiles dans le système végétal peuvent être classés comme suit (Baset Mia, 2015):

- i.* Très mobile dans le xylème et le phloème : N, P, K et Cl;
- ii.* Modérément mobile grâce au système du phloème : Zn;
- iii.* Moins mobile grâce au système du phloème : S, Fe, Mn, Mo et Cu;
- iv.* Immobile par le système du phloème: Ca et B.

Les connaissances sur la mobilité des nutriments sont utiles au diagnostic de carence en nutriments. Selon Taiz *et al.* (2015), si un élément essentiel est mobile dans la plante, les symptômes de carence ont tendance à apparaître en premier lieu sur les feuilles les plus âgées alors que les carences en éléments essentiels immobiles se manifestent d'abord dans les jeunes feuilles.

II.2.2.5. Classification sur la base de la propriété métallique des éléments nutritifs

Sur la base des propriétés métalliques, les éléments nutritifs peuvent être classés en deux groupes (Baset Mia, 2015).

- i.* -**Éléments métalliques** : K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu.
- ii.* **Éléments non métalliques** : N, P, C, H, O, S, B, Mo, Cl.

II.2.2.6. Classification selon la fonction des éléments nutritifs essentiels dans la plante

Le Classement des éléments est fait selon la fonction qu'ils assurent dans un processus bien déterminé ainsi que leur comportement biochimique et physiologique, plus adapté à une vision dynamique de la nutrition (Baset Mia, 2015).

i. Les éléments fournissant la structure de base des plantes et sont abondants dans la terre. Exemple : C, H et O.

ii. Éléments utilisés pour le stockage, le transfert et la liaison de l'énergie : ce sont des éléments structuraux accessoires qui sont plus actifs et vitaux pour les tissus vivants. Exemple : N, S, P et B.

iii. Les éléments sont nécessaires pour l'équilibre de charge, l'équilibrage électrolytique dans le cytosol. Exemple : K, Ca et Mg.

iv. Les éléments sont impliqués dans l'activation enzymatique soit en tant que groupe prosthétique, soit en tant que modulateur et agissent comme processus de transfert d'électrons. Exemple: Fe, Mn, Zn, Cu, Mo et Cl

II.2.2.6.1. Fonction des Macro-éléments

i. Azote (N)

L'azote est un constituant essentiel de la matière vivante végétale. Il entre dans la composition chimique des acides aminés (protéines, acides nucléiques, et enzymes), des acides nucléiques (support de l'information génétique), des certaines hormones (l'acide-3-indole acétique, les cytokinines) et de toutes les substances métaboliques indispensables à la vie de la plante (chlorophylle, régulateurs de croissance...etc.). C'est un facteur essentiel de la multiplication et de l'élongation cellulaire. Sa disponibilité a un effet direct sur la vitesse et la durée de la croissance végétative des pousses, le nombre et la vigueur des ramifications, ainsi que sur la croissance et le grossissement des organes reproducteurs (Hopkins, 2003; Harkat, 2014; Baset Mia, 2015). La carence en azote se caractérise par un jaunissement, une réduction de la croissance des pousses et des feuilles, une accumulation d'amidon, un vieillissement prématuré et une chute des feuilles (Schulze *et al.*, 2005).

ii. Phosphore (P)

Le phosphore joue un rôle physiologique à plusieurs niveaux: il favorise la croissance de la plante, le développement des racines, et la rigidité des tissus, la qualité des produits végétaux (Abail, 2013). Il entre dans la constitution des molécules nécessaires à la vie cellulaire (phospholipides, acides nucléiques, nucléotides, coenzymes et phosphoprotéines), joue un rôle central dans tous les processus métaboliques incluant la photosynthèse et la respiration, et assure le transfert d'énergie, une des fonctions primordiales dans le végétal (Cheaib, 2006). Les phosphates inorganiques et organiques dans les plantes servent également comme tampons dans le maintien du pH cellulaire (Barker *et al.*, 2007). Les plantes rabougries par une carence en phosphore ont souvent de petites feuilles vert foncé et des tiges courtes et minces. La déficience en phosphore engendre un ralentissement de la croissance des plantes, une réduction dans la taille des fruits et une récolte limitée (Barker *et al.*, 2007).

iii. Potassium (K)

Le potassium (K^+) Constitue le cation inorganique le plus abondant dans le cytosol de toute cellule, animale ou végétale. Le K^+ joue un rôle important, à la fois au niveau cellulaire et au niveau de l'organisme entier. Il contrôle le potentiel hydrique et la pression de turgescence des cellules; K^+ est en conséquence impliqué dans le contrôle de l'élongation et de la croissance cellulaire, ou encore dans la régulation de l'ouverture stomatique et ainsi des échanges gazeux (CO_2 et vapeur d'eau) (Maurel *et al.*, 2012). La carence en potassium se manifeste par une croissance réduite et remobilisation des organes vieillissants, une relation hydrique perturbée, un flétrissement particulier au bord des feuilles plus âgées, un jaunissement et une chute précoce des aiguilles (Schulze *et al.*, 2005).

iv. Soufre (S)

Le soufre joue un rôle structural dans la synthèse de plusieurs acides aminés (cystéine, cystine et méthionine) et dans les composés impliqués dans les transferts d'électrons dans la photosynthèse et la respiration (Sonneveld *et al.*, 2009). Il intervient dans la synthèse des acides gras (lipides) et d'enzymes vitales et de quelques vitamines (vitamine B1...). Le soufre est coenzyme nécessaire à la formation des chloroplastes. Les carences en soufre, provoquent une chlorose générale de la feuille englobant les tissus périvasculaires. Ceci résulte d'une réduction de la synthèse protéique plutôt que d'une réduction directe de la synthèse de chlorophylle (Hopkins, 2003).

v. Magnésium (Mg)

Le magnésium est le minéral le plus important dans l'activation des enzymes. Toutes les enzymes, phosphorylases (incorporation et transfert de phosphore inorganique-Pi) dépendent de la présence du Mg, qui forme un pont entre l'ATP ou l'ADP et la molécule de l'enzyme. Il est également l'élément structural central de la chlorophylle, il est impliqué ainsi dans la synthèse des acides nucléiques. Une carence en magnésium provoque un affaissement des tissus conducteurs. Les cellules du mésophylle demeurent turgescentes car cet affaissement conduit à une accumulation d'amidon qui ne peut être relocalisée (Wiedenhoeft, 2006; Vitti *et al.*, 2006 in Borin *et al.*, 2013).

vi. Calcium (Ca)

Le calcium est un cation divalent qui joue des rôles importants dans la structure cellulaire de la paroi et des membranes végétales. Il joue un rôle dans la transduction du signal dans la plante (Wiedenhoeft, 2006). Les symptômes de carence calcique se manifestent dans les régions méristématiques, là où les cellules sont en division et où de nouvelles parois cellulaires sont en formation. Les pointes de croissance des racines et les jeunes feuilles sont déformées et nécrosées et la mort des méristèmes peut survenir lors de carences prononcées (Uchida, 2000; Hopkins, 2003). La carence en calcium peut se traduire par une croissance faible, une malformation des jeunes feuilles et une diminution ou inhibition de fructification (Kochhar *et al.*, 2020).

II.2.2.6.2. Fonction des Micro-éléments

Les éléments mineurs ou micro-éléments, sont des éléments essentiels à la croissance des plantes et sont nécessaires en quantité moindre selon Wiedenhoeft (2006). Les micro-éléments jouent un rôle structural dans les protéines. Ils sont impliqués dans l'activité de cofacteurs enzymatiques, et/ou participent à des réactions d'oxydo-réduction qui assurent les transferts d'électrons dans la cellule. La carence ou l'excès d'approvisionnement en micro-éléments induit des désordres physiologiques importants (Borin *et al.*, 2013).

Le **fer (Fe)** est un cofacteur ou un élément structural des molécules organiques, il intervient dans un grand nombre de voies métaboliques essentielles à la vie cellulaire et, à fortiori, à celle du végétal, telles que la photosynthèse, la respiration, le métabolisme de l'azote ou encore les processus de détoxification (Guerinot et Yi, 1994 *in* Jana, 2009). Le Fe est impliqué dans les complexes protéiques Fe-S des photosystèmes, les cytochromes (structure tétra pyrrolique de l'hème) et les ferrédoxines. Une carence en cet élément affecte donc l'ensemble des processus physiologiques d'un végétal (Morot-Gaudry *et al.*, 2012).

Le **manganèse (Mn)** est essentiel à la synthèse de la chlorophylle et sa fonction principale est liée à l'activation d'enzymes. Parmi ces autres fonctions, le manganèse joue un rôle déterminant dans le système d'oxydation de l'eau constitutif du photosystème. La carence en manganèse se manifeste par une croissance diminuée et un ralentissement de la synthèse des hydrates de carbone et des protéines (Morot-Gaudry *et al.*, 2012; Borin *et al.*, 2013).

Le **zinc (Zn)** est un micro-élément important pour la croissance et le développement de la plante. Il joue un rôle important dans des processus biochimiques dans la plante, entre autres pour la biosynthèse de chlorophylle (Taiz *et al.*, 2015). Sa fonction principale est mal connue. Il entre dans la composition des enzymes déshydrogénases nécessaires pour la synthèse d'acides aminés, et entre dans la synthèse du tryptophane qui est un précurseur d'auxine (Hamdani, 2020). La carence en zinc se traduit par un nanisme ainsi que par des chloroses assez sévère et une mauvaise nouaison (Hopkins, 2003).

Le **bore (B)** participe directement dans l'intégration structurelle et la stabilisation des parois cellulaires et de la membrane cellulaire. Il joue un rôle dans la croissance des méristèmes, la migration des glucides et assimilés, la synthèse des acides nucléiques et des protéines (Kochhar *et al.*, 2020; Hamdani, 2020). La carence en bore se caractérise par une croissance ralentie; les organes les plus jeunes et particulièrement les bourgeons terminaux sont endommagés. Des fentes liégeuses apparaissent sur les tiges et les racines.

Le **chlore (Cl)** aide à maintenir la neutralité électrique à travers les membranes et il est l'un des principaux solutés osmotiquement actifs dans la vacuole. Il est indispensable dans les réactions photosynthétiques productrices d'oxygène (Hopkins, 2003; Kochhar *et al.*, 2020). Les plantes carencées en chlore présentent une croissance réduite.

Le **molybdène (Mo)** est une composante essentielle dans deux enzymes (nitrate réductase et nitrogénase) qui convertissent le nitrate en nitrite (une forme toxique d'azote) et ensuite en ammoniac, avant qu'il ne soit utilisé pour la synthèse des acides aminés. Il est également requis par les bactéries symbiotiques fixatrices d'azote chez les légumineuses pour la fixation de l'azote atmosphérique. Les plantes utilisent également le molybdène pour convertir le phosphore inorganique en formes organiques (Hamdani, 2020). Les

plants carencés se rabougrissent et manquent de vigueur. La feuille en entier devient pâle et une nécrose marginale peut également se produire.

II.2.3. Absorption des éléments minéraux

Chez les plantes, l'absorption de l'eau et des éléments minéraux s'effectue au niveau des racines principales et secondaires. Les échanges entre le sol et l'appareil racinaire sont accrus par la présence de poils absorbants qui se développent au niveau de la zone de maturation de la racine (Heller et Rona, 2004 *in* Charaf, 2015). L'absorption des éléments minéraux se fait en deux étapes (Hamdani, 2020):

i. L'adsorption: Étape de fixation superficielle, passive et réversible pendant laquelle, l'élément adsorbé peut être désorbé. La racine exprime un pouvoir adsorbant par lequel elle peut échanger ses cations avec la solution du sol c'est la capacité d'échange cationique racinaire (C.E.C.R.);

ii. L'absorption: L'absorption est deuxième l'étape, elle peut être active ou passive, selon les ions.

Les nutriments du sol doivent être acheminés en solution, du sol jusqu'au xylème pour ensuite être distribués à l'ensemble des tissus végétaux. Pour parvenir jusqu'aux vaisseaux conducteurs localisés dans la stèle, ils progressent transversalement et de façon centripète dans la racine. Ce trajet peut être schématisé en trois étapes (Figure II.2.) (Hopkins, 2003; Jana, 2009; Hamdani, 2020):

i. La voie transmembranaire

L'eau et les ions peuvent se déplacer à travers la membrane plasmique (ce déplacement est le moins utilisé). Les substances sortent d'une cellule et pénètrent dans la cellule voisine en traversant la membrane et la paroi cellulaires.

ii. La voie apoplastique

Il y a la **voie apoplastique** où les ions et l'eau se déplacent dans l'espace de la paroi. Le déplacement se fait de la forte concentration vers la plus faible concentration. Le mouvement des ions se fait d'une manière rapide et passive sans traverser de membrane. L'ensemble des parois cellulaires, du liquide interstitiel et des cellules mortes du xylème forme l'apoplasme.

iii. La voie symplastique

Il y a la **voie symplastique** où l'eau et les ions pénètrent dans la cellule et se déplacent par les plasmodesmes. C'est un mouvement lent et actif qui nécessite de

l'énergie (ATP). Le symplasma est constitué de l'ensemble du cytoplasme des cellules. Les substances passent d'une cellule à une autre en empruntant les plasmodesmes.

Une fois arrivés à l'endoderme, il y a une sélection entre les ions. Dans cet endroit, les molécules ne peuvent que passer par la membrane plasmique (voie du symplasma) qui permet de faire une sélection car la bande de Caspary, constituée de cire, les empêche de passer. Puis une fois l'endoderme passé, les 3 voies de déplacements peuvent être de nouveau empruntées jusqu'à être chargées dans le xylème.

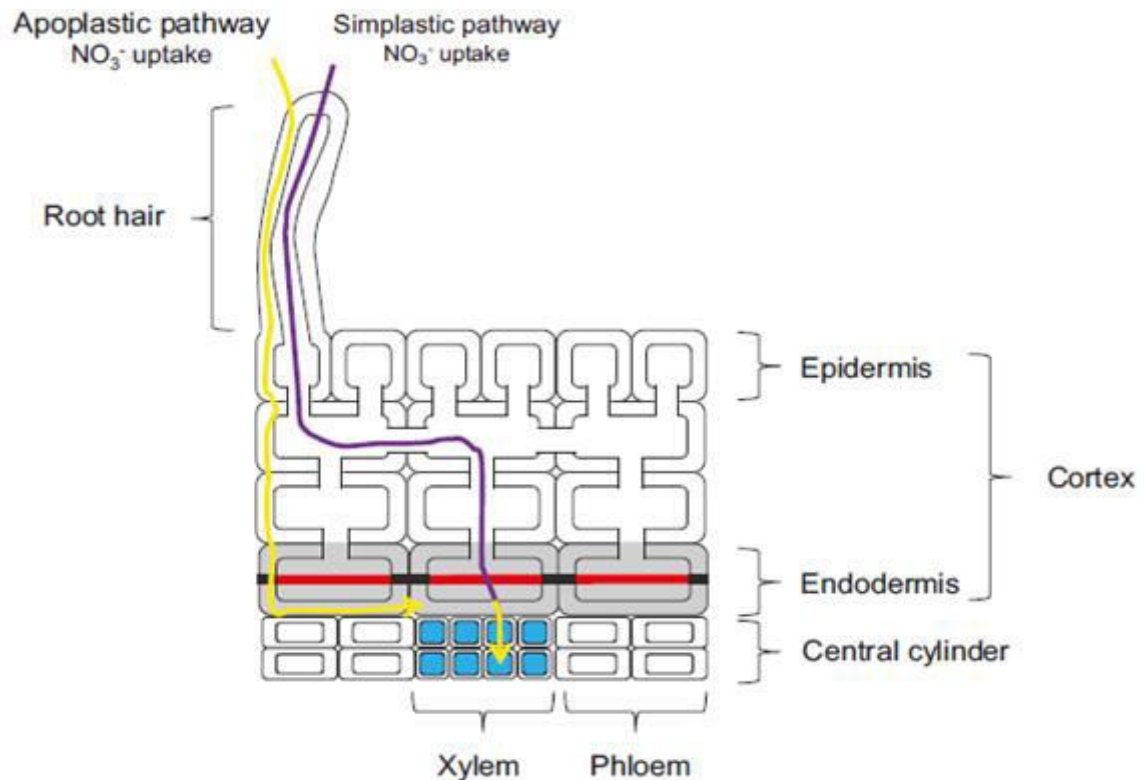


Figure II.2. Transport radial des éléments minéraux dans la racine par les voies apoplasme et symplasma (De Mello Prado, 2021).

II.2.4. Systèmes de transport des ions minéraux dans la plante

Une fois absorbés dans la racine, les ions sont véhiculés dans les tissus, soit par la voie transmembranaire, soit dans le réseau des parois cellulaires (apoplaste), soit de cellule à cellule en traversant les membranes (symplaste), puis sont déchargés dans les vaisseaux du xylème. Il existe deux modes de transport (Figure II.3) (Morot-Gaudry *et al.*, 2012; Boccon-Gibod, 2014):

i. Le transport est dit **passif** lorsqu'il s'effectue dans le sens d'une diminution du potentiel électrochimique de cet ion, autrement dit quand l'énergie de l'ion est plus faible dans le compartiment d'arrivée que dans le compartiment d'origine.

ii. Le transport est dit **actif** lorsque l'énergie de l'ion est au contraire plus forte dans le compartiment d'arrivée que dans le compartiment d'origine. Le transport actif s'effectue dans le sens d'une augmentation du potentiel électrochimique de l'ion.

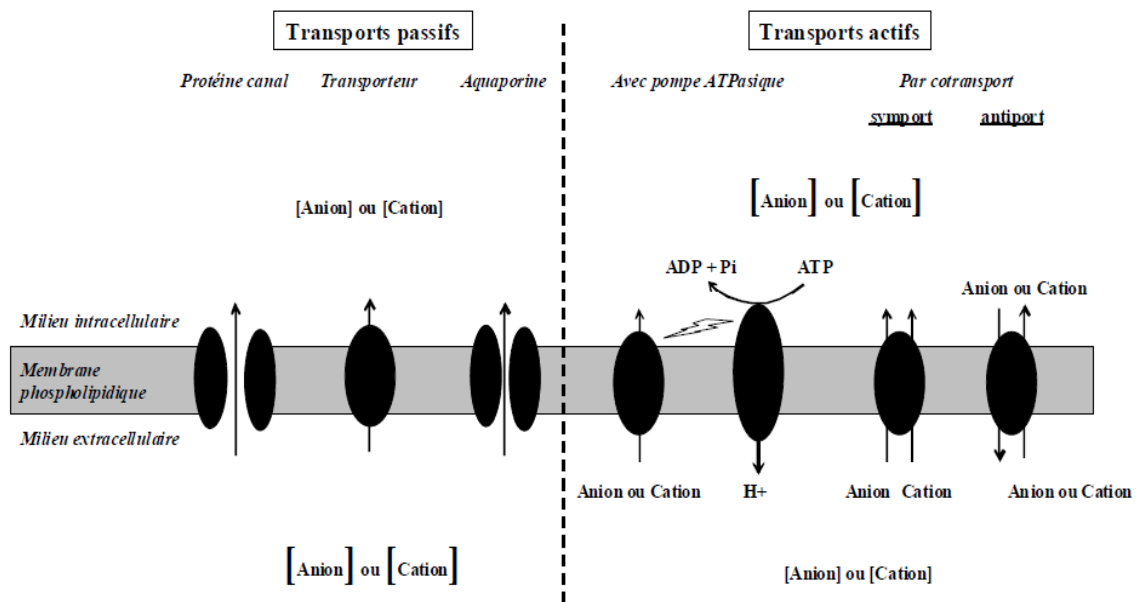


Figure4: Schéma des différents transports passifs et actifs au travers d'une membrane plasmique d'une cellule végétale (Delaire, 2005).

II.2.5. Interactions entre éléments minéraux

Il existe entre les éléments minéraux des interactions qui font que l'action de l'un est modifiée par la présence d'un autre (Morot-Gaudry *et al.*, 2012). Selon Martin-Prével *et al.* (1984), l'absorption d'un élément minéral ne se fait pas d'une manière totalement indépendante de celle des autres éléments. Le potentiel d'assimilation spécifique d'une espèce végétale et la disponibilité des éléments fertilisants dans le sol sont perturbés par les interactions (Harkat, 2014). Les ions se font concurrence pour le port ionique ou le canal ionique. Trois types d'interactions, à savoir la compétition, la synergie et les antagonismes entre les ions, se retrouvent dans le processus d'absorption des nutriments (Baset Mia, 2015; De Mello Prado, 2021).

- **Antagonisme:** La présence d'un élément nutritif diminue l'absorption d'un autre. Par exemple: le nitrate facilite l'absorption du potassium; et une absorption importante de potassium entrave l'absorption de magnésium.
- **Synergisme:** La présence d'un élément donné augmente l'absorption d'un autre nutriment.

- **Inhibition:** l'inhibition consiste à réduire l'absorption d'un nutriment à cause de la présence d'un autre ion. Il existe deux types d'inhibition: inhibition compétitive et inhibition non compétitive.

- **Inhibition compétitive:** se produit lorsque deux éléments entrent en compétition pour un même site porteur, diminuant l'absorption du nutriment avec la concentration la plus faible. Le système transporteur ne peut donc pas distinguer les deux ions, par exemple : K^+ et Rb^+ , SeO_4^{2-} et SO_4^{2-} , Zn^{2+} et Ca^{2+} . Ainsi, ce phénomène peut être corrigé en augmentant la concentration du nutriment déficient dans la solution du sol.

- **Inhibition non compétitive:** se produit lorsque la liaison se produit à différents sites. Ainsi, la concentration du nutriment n'affecte pas sa présence. Par exemple: K^+ inhibe l'absorption de Mg^{2+} et Ca^{2+} , $H_2PO_4^-$ inhibe l'absorption de Zn^{2+} et Mg^{2+} inhibe l'absorption de Zn^{2+} .

II.2.6. Effet de la nutrition sur la santé végétale

Tous les facteurs qui affectent l'équilibre interne et le fonctionnement d'une plante peuvent diminuer ou accroître sa sensibilité aux attaques des ravageurs et des maladies. Ceci pourrait être des facteurs liés à la plante, à l'environnement ou aux pratiques de gestion telle que la fertilisation (Guazzelli *et al.*, 2008).

D'après Chaboussou (1981), la sensibilité d'une plante cultivée par rapport aux ravageurs et aux maladies dépend de son état nutritionnel. Les ravageurs et les maladies n'attaqueront pas une plante saine. La santé d'une plante est directement liée à son équilibre interne qui est en perpétuelle mutation. Selon le même auteur, les ravageurs et les maladies n'attaquent pas toutes les plantes, mais uniquement celles qui pourraient servir d'aliments à l'insecte ou au pathogène. Si une plante dispose d'une quantité de substances suffisante pour alimenter les ravageurs et les maladies, c'est parce qu'elle n'a pas été traitée selon les méthodes optimales de culture.

Selon plusieurs auteurs, la nutrition minérale peut avoir tellement d'effets aussi bien sur la croissance que sur le développement des plantes, qu'il est logique de s'attendre également à des répercussions sur la composition des tissus. En outre, les apports en minéraux modifieront d'autant les teneurs de certaines substances si ce sont des constituants directs de ce composé ou s'ils jouent un rôle central dans la synthèse ou le stockage de ce composé (Grusak et DellaPenna, 1999 *in* Bernard, 2009; Crosby, 2008 *in* Camille, 2009). D'après Camille (2009), la nutrition induisant des variations aussi bien au niveau du métabolisme primaire qu'au niveau du métabolisme secondaire.

Chapitre 3

CHAPITRE III. BIOFERTILISANT

-Introduction

Deux approches complémentaires sont possibles pour favoriser la fertilité biologique des sols: (i) utiliser des méthodes qui vont stimuler *in situ* l'activité des microorganismes bénéfiques (ii), introduire massivement des microorganismes préalablement sélectionnés pour leurs activités bénéfiques (Alabouvette et Cordier, 2018).

La première approche est celle qui est privilégiée dans le cadre de l'agro-écologie. Elle fait appel à un ensemble de méthodes et de moyens qui concourent à préserver, voire augmenter la diversité des communautés microbiennes, à préserver la teneur en matières organiques des sols, etc. Cela passe par un allongement des rotations, le choix de techniques de travail du sol moins perturbantes qu'un labour profond, la culture de plantes hébergeant une microflore utile telles que les légumineuses et leur association symbiotique avec les rhizobiacées, des apports de matières organiques etc.... La seconde approche celle qui fait appel à l'apport de « biostimulants » ou « Biofertilisants » (Alabouvette et Cordier, 2018).

III.1. Généralité sur les biofertilisants

III.1.1. Définition

Les biofertilisants peuvent également être appelés « biostimulants », « stimulateurs de croissance et/ou développement », « activateurs de sol » ou encore « phytostimulants » (Faessel *et al.*, 2015 in Fruchart, 2016). D'après la définition retenue par l'EBIC (European Biostimulants Industry Council) un biofertilisant est : « un matériel qui contient une (des) substance(s) et/ou microorganisme(s) dont la fonction, quand ils sont appliqués aux plantes ou à la rhizosphère, est de stimuler les processus naturels pour améliorer/avantager l'absorption des nutriments, l'efficacité des nutriments, la tolérance aux stress abiotiques, et la qualité des cultures, indépendamment du contenu en nutriments du biostimulant » (European Biostimulants Industry Council). Cette approche inclut une large gamme de micro-organismes comme par exemple les **rhizobactéries**, les **cyanobactéries**, et les **champignons mycorhiziens**. Ceux-ci sont utiles pour la croissance, le rendement, l'assimilation de nutriments et la défense des plantes face à différents stress en déclenchant différents gènes liés à la croissance et la défense, au travers des réseaux de signaux cellulaires (Lugtenberg *et al.*, 2009; Fruchart, 2016).

D'après Alabouvette et Cordier (2018), les biostimulants ou les biofertilisants n'ont pas d'action directe vis-à-vis des agents pathogènes et de ce fait ne tombent pas sous le coup de la réglementation des pesticides.

Selon Mishra *et al.* (2013 *in* Assemien, 2018), les biofertilisants sont définis comme des préparations contenant des cellules vivantes ou des cellules latentes de souches de micro-organismes efficaces qui aident à l'absorption des éléments minéraux par les plantes cultivées suite à leurs interactions dans la rhizosphère lorsqu'ils sont appliqués sur les semences ou dans le sol. Ils accélèrent certains processus microbiens dans le sol impliqués dans l'augmentation de la disponibilité des éléments nutritifs dans une forme facilement assimilable par les plantes (Vessey, 2003 *in* Assemien, 2018). Les biofertilisants interviennent dans un aspect crucial de l'agriculture biologique et sont des acteurs majeurs de l'économie et de la production agricole générale à l'échelle mondiale (Pravin *et al.*, 2016 *in* Assemien, 2018).

III.1.2. Différents types de biofertilisants

III.1.2.1. Biofertilisants à base de rhizobactéries favorisant la croissance des plantes

Les rhizobactéries sont des bactéries qui colonisent les racines ou la rhizosphère du sol et qui sont bénéfiques aux cultures (PGPR) (Assemien, 2018). Ces bactéries connues sous le terme PGPR stimulent directement la croissance de plantes en augmentant le prélèvement des éléments nutritifs du sol, en induisant et produisant des régulateurs de croissance végétale et en activant les mécanismes de résistance induite chez les végétaux. Elles stimulent indirectement la croissance des végétaux par leur effet antagoniste sur la microflore néfaste, en transformant les métabolites toxiques et en stimulant la nodulation des légumineuses par les *Rhizobia* (Cherif, 2014). Les rhizobactéries sont actuellement commercialisées sous forme d'inoculum. Lorsque les biofertilisants sont appliqués sur les graines, les surfaces des plantes ou le sol, ils colonisent la rhizosphère ou l'intérieur de la plante, et semblent promouvoir la croissance des plantes en augmentant l'offre ou la disponibilité des éléments nutritifs primaires à la plante hôte (Vessey, 2003) ainsi que l'inhibition des agents pathogènes de croissance (Vessey, 2003 *in* Assemien, 2018).

Selon Boisvert (2014), les PGPB sont divisées en deux groupes pouvant stimuler la croissance des plantes de façon directe et indirecte.

- Le premier groupe influence directement le métabolisme de la plante en fournissant les substances qui sont habituellement en quantité limitée dans le sol. On y regroupe les bactéries capables de solubiliser les phosphates insolubles, d'augmenter la production des phytohormones (indole-acétique, les cytokinines, les gibbérellines et les inhibiteurs de la production d'éthylène) et de fixer l'azote atmosphérique (Bashan *et al.*, 2008 *in* Boisvert, 2014; Alamri *et al.*, 2015). Elles peuvent aussi augmenter la tolérance des plantes à divers stress tels les pesticides et le stress hydrique y compris la sécheresse (Cohen *et al.*, 2009 *in* Boisvert, 2014).

- Le deuxième groupe bactérien, nommé bio-contrôle-PGPB, ne stimule pas directement le métabolisme de la plante. Par contre, il influence indirectement la

croissance de celle-ci par la prévention des effets causés par des phytopathogènes tels des bactéries, des mycètes, des nématodes et des virus (Bashan *et al.*, 2008 in Boisvert, 2014).

III.1.2.2. Biofertilisants à base des bactéries solubilisatrices des éléments minéraux

i. Bactéries solubilisant le silicate (SSB)

Les bactéries solubilisant le silicate sont des micro-organismes capables de dégrader les silicates qui sont des minéraux formés à partir d'un motif élémentaire tétraédrique (SiO_4). Ils fournissent : (i) des ions H^+ dans le milieu favorisant ainsi l'hydrolyse ; (ii) 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 (Agritech, 2014 in 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, des sols argileux, des sols sableux et la terre vallonnée ont 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 (Amutha *et al.*, 2014 in Assemien, 2018).

ii. Bactéries solubilisant le phosphate (SPB)

Les bactéries solubilisatrices de phosphore ont été considérées comme les meilleurs candidats écologiques pour la nutrition des plantes par le phosphore (Sharma *et al.*, 2007 in Chibani, 2017). Ces organismes possèdent une capacité de solubilisation du phosphate et peuvent également convertir les composés phosphatés insolubles présent dans le sol à des formes solubles et les rendre disponibles pour les plantes (Pradhan et Sukla, 2006 in Chibani, 2017). Les bactéries solubilisatrices de phosphore ont plusieurs bénéfices agronomiques : (1) Amélioration de la disponibilité en phosphore inorganique; (2) Accélération des premiers stades de développement; (3) Augmentation de la croissance racinaire; (4) Rigidité des tissus; (5) Amélioration de la formation des grains; (6) Augmentation et sécurisation du rendement. A l'instar des bactéries fixatrices d'azote, les bactéries solubilisatrices du phosphore améliorent la qualité nutritionnelle et la résistance de la plante, permettant ainsi à la culture d'assurer son rendement (Schütz *et al.*, 2018 in Assemien, 2018).

Selon Chibani (2017), un nombre important d'espèces microbiennes ayant la capacité de solubilisation du phosphate a été isolé et identifié ; celles-ci comprennent des bactéries, des champignons, des actinomycètes et même des algues microscopiques. En plus de *Pseudomonas* et de *Bacillus*, d'autres bactéries se sont identifiées comme solubilisant le phosphate, il s'agit de : *Rhodococcus*, *Arthrobacter*, *Serratia*, *Chryseobacterium*, *Gordonia*, *Phyllobacterium*, *Delftia sp.*, *Azotobacter*, *Xanthomonas*, *Enterobacter*, *Pantoea*, et *Klebsiella*. Alors que la flore fongique solubilisant le phosphate, est représentée essentiellement par les genres, *Aspergillus* et *Penicillium*.

III.1.2.3. Biofertilisants à base des bactéries fixatrices d'azote

Les bactéries fixatrices d'azote ont été isolées de la rhizosphère de la majorité des plantes cultivées présentant le plus souvent un taux d'azote fixé inférieure à 20 kg par hectare et par cycle cultural (Roger et Ladha, 1992). Les bactéries fixatrices d'azote sont des bactéries qui peuvent exister soit sous forme libre (seules ou en symbiose avec d'autres bactéries du sol), soit en symbiose avec des plantes tout en assurant la fixation de l'azote atmosphérique (N₂). En fonction de leur régime respiratoire, ces micro-organismes peuvent être soit aérobies, soit anaérobies. Il s'agit des bactéries symbiotiques (notamment les rhizobiums, les bactéries du genre *Azospirillum*, les cyanobactéries et *Azolla*) et des bactéries non symbiotiques (*Beijerinckia*, algues bleues, l'espèce *Azotobacter*) (Alamri *et al.*, 2015; Assemien, 2018).

III.1.2.3.1. Bactéries non-symbiotique: *Azotobacter*

Les *Azotobacter* fixent mieux l'azote atmosphérique dans les sols où les apports d'azote minéral sont réduits. L'importance de la fixation non symbiotique d'azote par les *azotobacters* est remarquablement influencée par les propriétés physico-chimiques des habitats (Dommergues, Mangenot, 1970 *in* Zombre, 2006). Les facteurs abiotiques peuvent affecter la composition spécifique des communautés microbiennes et leur potentiel biochimique (Alexander, 1977 *in* Zombre, 2006). Les *Azotobacter* peuvent fixer au moins 10µg d'azote/g de glucose consommé. Ces bactéries exigent néanmoins des apports organiques importants probablement comme source de carbone. Parmi les espèces, d'*Azotobacter*, *Azotobacter chroococcum* présente l'espèce dominante dans les sols arables capable de fixer l'N₂ pour une dose qui varie entre 2-15 mg N₂ / g de sol à partir d'une source de carbone dans les milieux de culture (Amutha *et al.*, 2014 *in* Alamri *et al.*, 2015).

III.1.2.3.2. Bactéries symbiotique

i. rhizobium

Les rhizobiums sont des bactéries du sol qui se caractérisent par leur faculté unique d'infecter les poils absorbants des légumineuses et de produire sur les racines des nodules, siège de la fixation d'azote atmosphérique (Franche *et al.*, 2009). Ils sont des micro-organismes en forme de bâtonnet qui existent uniquement à l'état végétatif. Ce sont des bactéries Gram négatif. A la différence de nombreux autres microorganismes du sol, les rhizobiums ne produisent pas de spores. Ils sont aérobies et mobiles (Jordan, 1984 *in* Alamri *et al.*, 2015). Le rhizobium est classé parmi les espèces économiquement importantes. Cet intérêt provient du fait de l'importance de la quantité d'azote dont il peut fixer. Cette fixation se déroule au sein des nodosités sur les racines des légumineuses (Gage, 2004).

ii. *Azospirillum*

Les bactéries du genre *Azospirillum* sont des habitants primaires du sol. On les retrouve aussi ; en symbiose à l'intérieur des espaces intercellulaires du cortex racinaire de certaines graminées (Agritech, 2014 in Alamri *et al.*, 2015). La découverte de cette association très active dite « symbiose associative » entre *Azospirillum* et certaines plantes autres que les légumineuses, a retenu l'attention des chercheurs dans la perspective d'améliorer la productivité agricole (Okon, 1985 in Ramdani *et al.*, 2002; Omar *et al.*, 1989 in Ramdani *et al.*, 2002). Il s'agit d'une fixation libre ou associée à la rhizosphère des graminées et dans ce dernier cas, elle est plus performante (Ramdani *et al.*, 2002). En effet, les essais d'inoculation sur diverses graminées par les souches d'*Azospirillum*, réalisés, ont permis d'améliorer substantiellement les rendements des cultures et de réduire au maximum utilisation des engrais azotés chimiques qui sont non seulement onéreux mais sont également responsables, par suite de lessivage, de la pollution des eaux de rivières et des nappes phréatiques (Ramdani *et al.*, 2002). En dehors de la fixation de l'azote, la production de substances de croissance, la résistance aux maladies et la tolérance à la sécheresse sont quelques avantages supplémentaires favorisés par l'inoculation des plants avec *Azospirillum* (Agritech, 2014 in Alamri *et al.*, 2015).

iii. *Azolla*

C'est une fougère flottante qui fixe l'azote atmosphérique en association avec l'algue bleue verte *Anabaena azollae* fixatrice d'azote. Les frondes d'*Azolla* se composent de sporophytes avec un rhizome flottant, de petites feuilles et des racines bilobées qui se chevauchent entre elles. Elle est utilisée comme engrais biologique pour le riz dans les zones humides en fournissant environ 40-60 kg d'N / ha par récolte de riz (Roger, 1993).

iv. Cyanobactéries

Les cyanobactéries (Algues bleues ou Cyanophycées) sont des micro-organismes photosynthétiques, morphologiquement proches des algues microscopiques, qui vivent, entre autres, dans les eaux douces et à la surface des sols (Roger et Dreyfus, 2009). Les cyanobactéries font partie des organismes largement étudiés parmi les vastes associations phyto-planctoniques et existent souvent dans des relations symbiotiques avec d'autres espèces fongiques et plantes (Inamuddin *et al.*, 2021). A leur mort, l'azote atmosphérique incorporé dans leur biomasse retourne dans l'environnement sous une forme qui peut être absorbé par les plantes. Dans les années 1980, de grands espoirs ont été mis dans la pratique de l'inoculation des rizières avec des inoculum cyanobactéries fixatrices d'azote pour accroître la production du riz par un apport d'azote organique considéré comme bon marché. Ces biofertilisants semblaient constituer une alternative ou un complément aux engrais azotés chimiques (Roger et Dreyfus, 2009). Selon Amutha *et al.* (2014), les cyanobactéries sont capables de fixer entre 20 et 30 kg d'N / ha dans des conditions idéales, mais leur utilisation n'est pas actuellement répandue vu que la préparation du biofertilisant représente elle-même une limitation et les mesures de contrôle de la qualité ne sont pas

généralement respectées. D'après Aghofack-Nguemezi *et al.* (2015), les cyanobactéries peuvent être utilisées pour optimiser quantitativement et qualitativement la production agricole. Parmi les cyanobactéries la spiruline sont utilisés comme engrais naturel ou biostimulant respectueux de l'environnement, de la santé des hommes et des animaux (Aghofack-Nguemezi *et al.*, 2015).

III. 2. Spiruline

La Spiruline, est une cyanobactérie traditionnellement consommée depuis des siècles par certaines populations (Farrar, 1966). La Spiruline, micro-organisme aquatique de 0,1 mm de long, est constituée de cellules juxtaposées formant un filament enroulé en spirale de couleur bleu-verte. À l'état naturel, elle se développe dans les lacs saturés de matière organique et de soude des pays chauds où elle se multiplie rapidement à partir de 30 degrés. Elle se reproduit par simple division, par photosynthèse : elle synthétise les protéines à partir du gaz carbonique et des sels minéraux en captant l'énergie de la lumière. La Spiruline reste avant tout une algue, donc un aliment. Il n'existe donc pas de risque de surdosage car les nutriments présents le sont à un dosage alimentaire. On peut donc consommer de la spiruline de manière régulière sans aucun risque (Mathelet, 2018).

III.2.1. Taxonomie

La position systématique de la *Spirulina platensis* est la suivante (Fox, 1999, Sguera, 2008):

- Règne : Monera ou Bacteria
- Sous- règne : Prokaryota
- Phylum : : Cyanobacteria ou Cyanophyta
- Classe : : Cyanophyceae
- Ordre : : Nostocales
- Famille : : Oscillatoriceae
- Genre : : *Arthrospira*
- Espèce : : *Arthrospira platensis* ou *Spirulina platensis*

III.2.2. Morphologie et caractères généraux

La spiruline est une cyanophycée microscopique pluricellulaire de couleur bleu-verte d'une longueur moyenne d'environ 250µm. Elle est composée de filaments mobiles de 10 à 12µm de diamètre non ramifiés et enroulés en spirale, généralement en 6 ou 7 spires. Cette forme hélicoïdale lui donnant l'allure d'une minuscule ressort (Figure III.1.) (Cruchot, 2008 ; Goulamabasse, 2018 ; Ferhat et Lakehal, 2019).

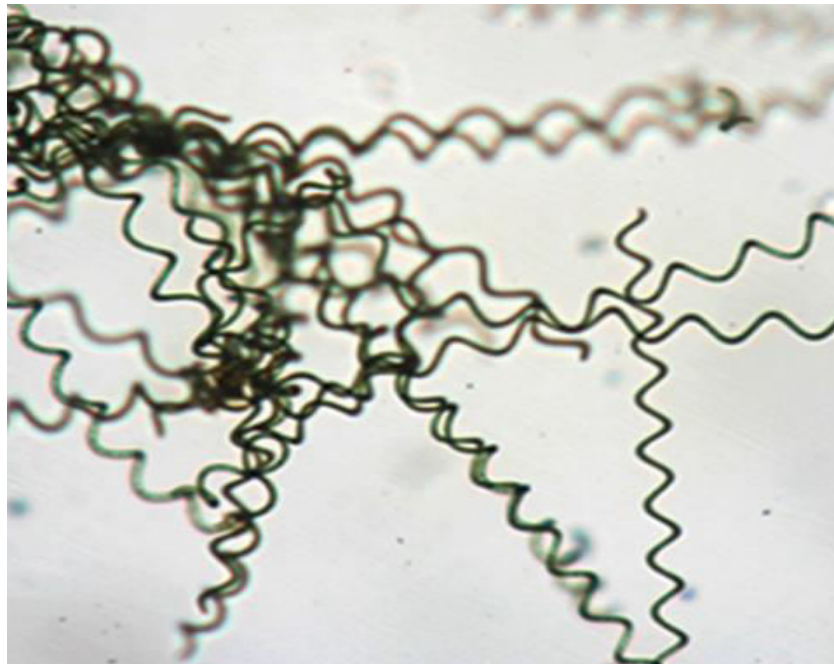


Figure III.1. Spiruline vue au microscope (Mathelet, 2018)

Cependant, les spirulines présentent différentes formes (Figure III.2). On trouve des formes spiralées classiques (Figure III.2.A), ondulées (Figure III.2.B) et parfois droites (Figure III.2.C). Cette particularité est en relation directe avec les conditions écologiques rencontrées dans leur habitat (Goulamabasse, 2018).

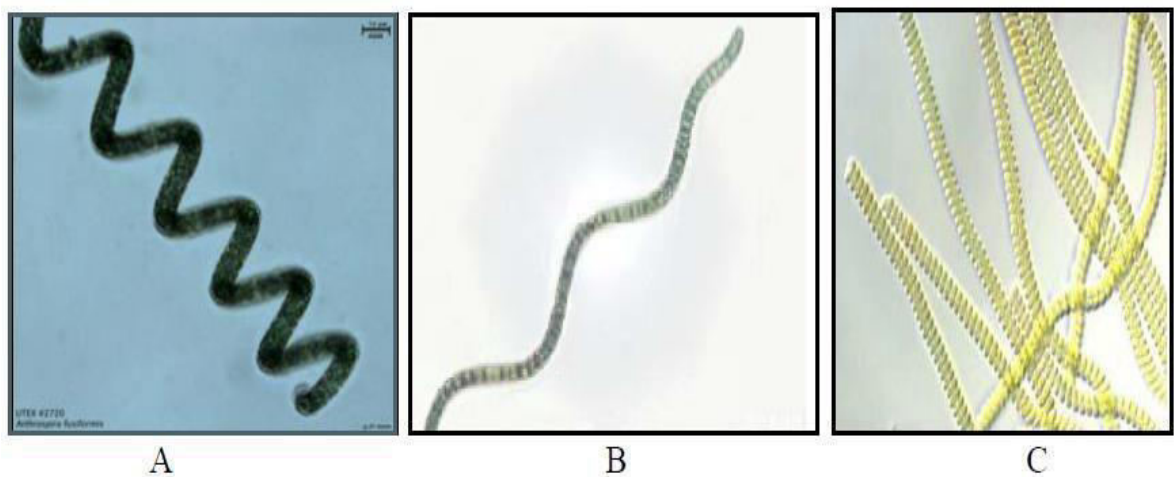


Figure III.2. Différents aspect de la spiruline (Goulamabasse, 2018)

A : Forme spiralée ; B : Forme ondulée ; C: Forme droite.

III.2.3. Cycle biologique

La *Spiruline* se présente sous forme de filaments constitués de cellules juxtaposées. La reproduction de la *spiruline*, asexuée, se fait par division des filaments (Jourdan, 2016). Le filament de *Spiruline* à maturité forme des cellules spéciales appelées nécridies. Elles se différencient des autres cellules par leur aspect biconcave et sont assimilées à des disques

de séparation. A partir de ces derniers, le trichome se fragmente pour donner de nouveaux filaments de 2 à 4 cellules appelés hormogonies qui vont croître en longueur par division binaire et prendre la forme typique hélicoïdale (Figure III.3.) (Zarrouk, 1966, Charpy, 2008). Sa vitesse de multiplication est particulièrement rapide dès que la température dépasse 30°C à l'ombre ; lorsque ces conditions sont réunies et que le milieu est favorable, le temps de génération maximal de la spiruline est voisin de 7 heures (Zarrouk, 1966 in Jourdan, 2006)

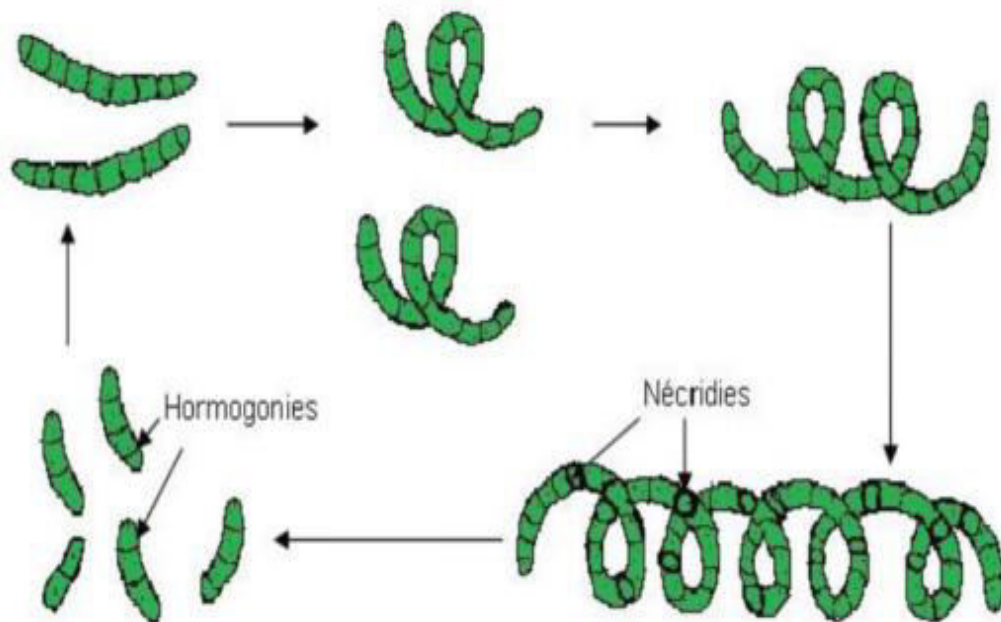


Figure III.3. Cycle de vie de la spiruline (Balloni et *al.*, 1980 in Charpy, 2008)

III.2.4. Situation de la culture de spiruline dans le monde

La biomasse de spiruline est produite commercialement principalement dans des étangs peu profonds et ouverts. Ce système est essentiellement constitué d'un canal à une seule boucle dans lequel la suspension de culture circule en écoulement turbulent par roue à aubes (Doumenge et *al.*, 1993). La principale culture commerciale à grande échelle de micro-algues a commencé au début des années 1960 au Japon avec la culture de *Chlorella*, suivie de *Spirulina Platensis* en 1970 dans le lac Texcoco, au Mexique et par la suite en France dans les années 1990. En 2013, la production mondiale a été estimée à 5000 tonnes.

La plus grande partie de la production vient des Etats-Unis d'Amérique (fermes Earthrise (DIC) en Californie, Cyanotech à Hawaï), de la Chine (DIC à Hainan) et de l'Inde (Figure) (Posten et Walter, 2012 ; N'Goran Urbain, 2017). La spiruline est produite dans plusieurs pays. La figure ci-dessous présente la cartographie mondiale de production commerciale de spiruline (N'Goran Urbain, 2017).



Figure III.4. Carte des principaux lieux de production de spiruline dans le monde (N’Goran Urbain, 2017).

L’Afrique reste l’un des continents où la production de spiruline est la plus faible malgré les conditions de culture favorables. La majorité des sites de production est créée par des ONG et autres organismes de soutien pour la lutte contre la malnutrition en Afrique. En Europe, la France est le principal pays producteur. La plupart des fermes se trouvent au sud de la France, à cause essentiellement des conditions climatiques favorables (Figure III.5.). L’ensemble de ces productions représente une production annuelle d’environ 40 tonnes selon la Fédération des Spiruliniers de France. Cette production ne couvre que près de 20 % de la consommation française. En effet, la demande intérieure des ménages est estimée aujourd’hui à environ 250 tonnes de spiruline par an (N’Goran Urbain, 2017).

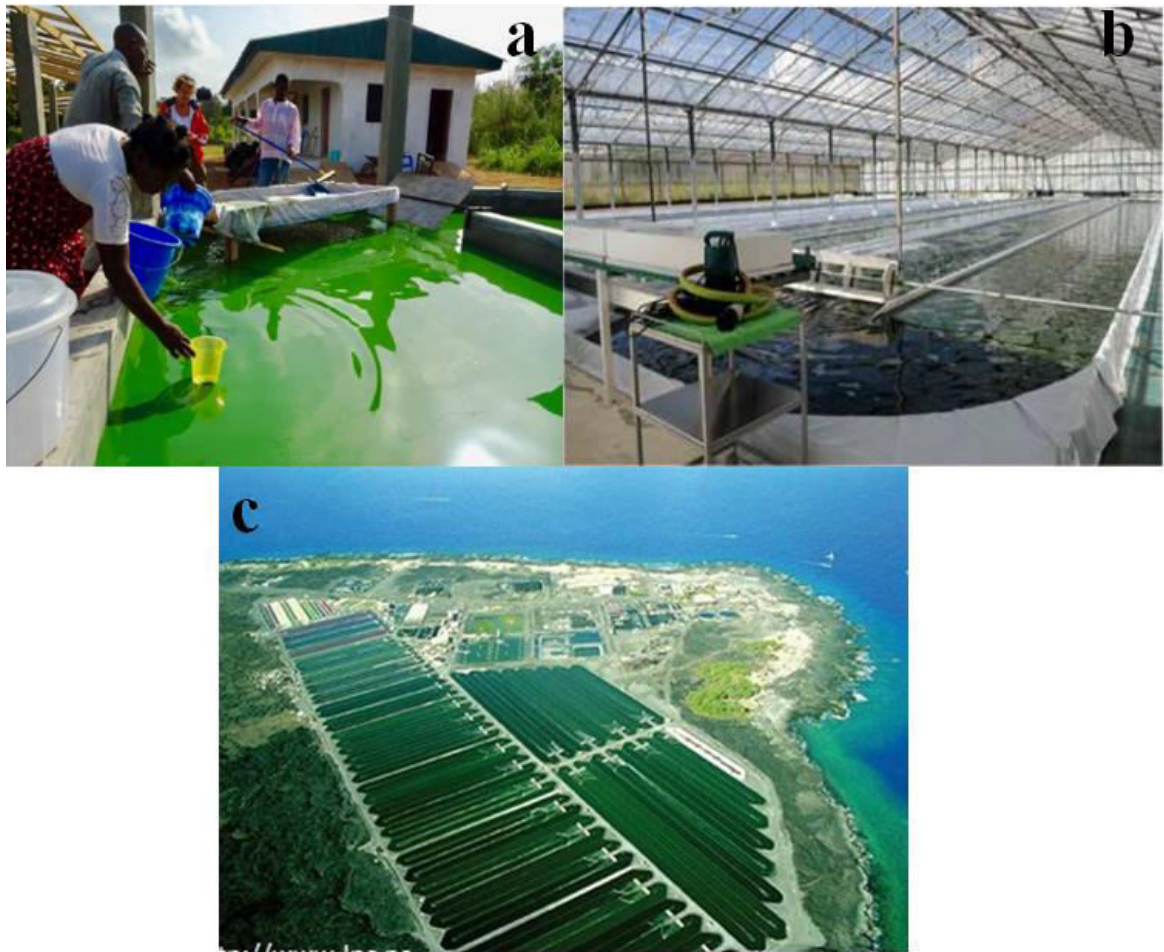


Figure III.5. Fermes à spiruline (N’Goran Urbain, 2017; <http://micro-algues-tpe.eklablog.com>).

A: Ferme de Raffierkro en Côte d’Ivoire ; B: Ferme à Hyères dans le Var France ; C: Bassin de la spiruline à Hawaï.

La culture de la spiruline en Algérie est toujours au stade artisanal et expérimental, une ferme pilote est installée au Sud de l’Algérie précisément dans la wilaya de Tamanrasset au début des années 2000, fondée par Dr Hiri Abdelkader, l’un des rares connaisseur des processus de production de la spiruline (Lounici, 2010; Chenafi, 2016 ; Bouchenafa, 2020). La ferme, qui se situe au niveau de l’agence 4X4, à Aderrin (à 5 Km de Tamanrasset ville), s’étend sur une superficie de 120 m² où sont installés 2 bassins en dur, couverts, de 4 m² chacun et 3 bassins en plastiques (montés par le fer) constituant des bassins de réserve (Figure III.6.). L’ensemble des bassins ont une capacité de production maximale de 20 kg de spiruline par an (Lounici, 2010, Bouchenafa, 2020).

Une autre ferme de culture de la spiruline d’une capacité de production théorique de deux tonnes/an est projetée dans la wilaya de Ghardaïa, Géré par une jeune ingénieure en aquaculture. La ferme occupera une assiette de 5 hectares localisée sur le territoire de la commune de Mansourah (70 km au Sud de Ghardaïa) (D.P.R.H., 2016 2018 *in* Bouchenafa, 2020). Selon Chenafi (2016), deux projets de production de la spiruline sont en voie de développement à Ouargla et à Biskra.

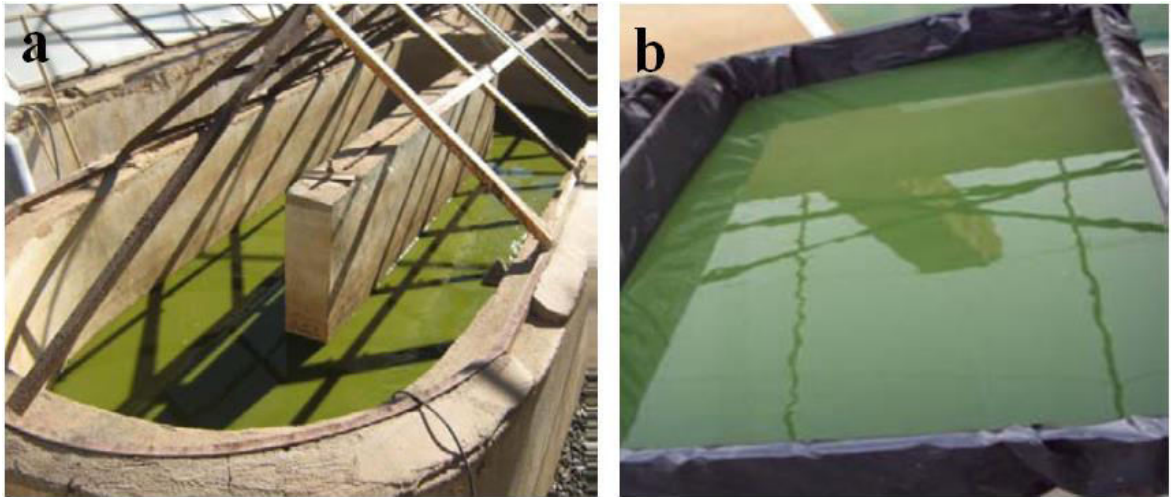


Figure III.6. Ferme à spiruline Tamanrasset, Algérie (Lounici, 2010).
a : Bassins en dur ; b : bassins en plastique

L'avantage pour les habitants du Sud de pouvoir exploiter et créer des petites entreprises à coût réduit où l'environnement naturel et les conditions climatiques sont propices pour le développement de la spiruline. En attendant des productions à grande échelle de spiruline, l'importation et la commercialisation de cette algue miracle, permet aux Algériens de profiter de ses vertus nutritionnelles et thérapeutiques (Anonyme, 2018 *in* Bouchenafa, 2020).

III.2.5. Composition de la spiruline

La spiruline contient en moyenne, en poids sec, jusqu'à 70 % de protéines, 15 à 25 % de glucides et près de 11 % de lipides ainsi que des vitamines, des minéraux (principalement des oligoéléments), de la chlorophylle A et des phycobiliprotéines. La variation des conditions de culture impacte sur la composition biochimique de la spiruline (N'Goran Urbain, 2017).

Tableau III.1. Composition de la spiruline (Mathelet, 2018)

COMPOSITION GÉNÉRALE		
Phytopigments		
Caroténoïdes totaux	mg / 100 g	400 à 500
Carotènes	mg / 100 g	160 à 260
B-Carotène	mg / 100 g	150 à 250
Xanthophylle	mg / 100 g	250 à 470
Lutéine	mg / 100 g	1 à 3
Zéaxanthine	mg / 100 g	125 à 200
Chlorophylle	mg / 100 g	1300 à 1700
Phycocyanine	mg / 100 g	12600 à 21000
AGL (acide g-linolénique)	mg / 100 g	1000 à 1500
SOD (superoxyde dismutase)	1000 UI / 100g	475 à 800
Nutriments		
Protéines	%	60 à 71
Glucides	%	15 à 25
Lipides	%	6 à 8,3
Fibres	%	6,5 à 9,5
Minéraux	%	7 à 9
Vit.B1 (thiamine)	mg / 100 g	0,15 à 0,30
Vit.B2 (riboflavine)	mg / 100 g	4 à 7
Vit.B3 (niacine)	mg / 100 g	13 à 29
Vit.B5 (acide pantothénique)	mg / 100 g	0,5 à 1,1
Vit.B6 (pyridoxine)	mg / 100 g	0,5 à 1,5
Vit.B7 (inositol)	mg / 100 g	70 à 90
Vit.B8 / H (biotine)	mcg / 100 g	20 à 30
Vit.B9 (acide folique)	mcg / 100 g	50 à 300
Vit.B12 (cobalamine)	mcg / 100 g	100 à 300
Vit.E (tocophérols)	mg / 100 g	10 à 11
Vit.K	mg / 100 g	0,9 à 1,05
Calcium	mg / 100 g	300 à 500
Cuivre	mg / 100 g	0,4 à 0,7
Chrome	mg / 100 g	0,1 à 0,3
Fer	mg / 100 g	50 à 140
Magnésium	mg / 100 g	270 à 600
Manganèse	mg / 100 g	2,7 à 6
Phosphore	mg / 100 g	900 à 1250
Potassium	mg / 100 g	1500 à 1900
Sélénium	mcg / 100 g	15 à 30
Sodium	g / 100 g	0,7 à 1
Zinc	mg / 100 g	1 à 3

III.2.6. Intérêts et domain d'utilisation

La Spirulina consommée depuis des siècles par certains peuples primitifs d'Afrique et d'Amérique, et connue par les scientifiques depuis plusieurs décennies pour sa richesse nutritionnelle, elle fait l'objet d'une redécouverte depuis quelques années. Riche en nutriments tel que protéines, glucides, lipides, vitamines et minéraux, elle riche ainsi en substances anti-oxydantes et anti radiculaire tels que les caroténoïdes, les poly phénols, la spiruline est à l'étude ou déjà utilisée sur tous les continents par des ONG (organisation non gouvernementale) pour lutter contre la malnutrition. Compte tenu de ses caractéristiques, la culture de la spiruline pourrait être une solution pour améliorer la santé humaine, la nutrition notamment dans les pays du tiers-monde et également pour développer des cultures industrielles. Cette cyanobactérie semble actuellement l'une des meilleurs solutions pour la production simple d'un complément alimentaire de haute qualité

et, du fait, de grandes entreprises se sont lancées dans la culture de cet organisme à une échelle industrielle (Unicef, 1996, Sguera S., 2008).

III.2.6.1. domaine médicinale

La composition exceptionnelle de la spiruline, découlent de multiples applications thérapeutiques dont les plus importantes sont (Dupont *et al.*, 2014):

- Le renforcement des défenses immunitaires (une opportunité pour lutter contre les maladies opportunistes);
- Le traitement de certaines affections dermatologiques;
- Elle constitue également un partenaire efficace pour calmer les douleurs rhumatismales et l'arthrose, la lutte contre l'ostéoporose, l'excès de cholestérol, l'hypertension, et les allergies. Elle protège le cœur et augmenterait la régénération des cellules cérébrales.

Toutes ces applications thérapeutiques de la spiruline ont permis aujourd'hui sa vente et sa consommation comme complément alimentaire.

III.2.6.2. domaine cosmétique

En cosmétique, la Spiruline est utilisée sous plusieurs formes comme dans les masques cryogéniques et crèmes anti-âge, par son action sur le renouvellement cellulaire et la tonicité des tissus. Elle peut également être utilisée en synergie avec d'autres algues, comme agent cicatrisant et antiseptique (Mohamed Seghir *et al.*, 2020).

Certains laboratoires de soins cosmétiques ont introduit la spiruline dans des crèmes, des shampoings ou des sérums qu'ils commercialisent du fait du nombre non négligeable d'actifs naturels retrouvés dans cette cyanobactérie (acides aminés, oligoéléments, anti oxydants, minéraux, vitamines, acides nucléiques (composants de l'ADN), protéines, acides gras essentiels...). Grâce à ses propriétés anti-oxydantes qui empêchent la formation de radicaux libres, la spiruline améliore la souplesse et l'élasticité de la peau et donc retarde son vieillissement et apporte brillance et résistance aux ongles et aux cheveux par les nutriments et les oligoéléments qu'elle concentre (Banks, 2007).

III.2.6.3. domaine agroalimentaire

Dans l'agroalimentaire, elle est utilisée comme colorant naturel (la phycocyanine est un des rares pigments naturels de couleur bleue) dans les chewing gums, sorbets, sucreries, produits laitiers, boissons non alcoolisées. Elle apparaît également dans une gamme de produits algaux mélangée à du sel, des tagliatelles etc. En Suisse et au Japon, il existe depuis longtemps du pain à la Spiruline (Charpy *et al.*, 2008, Boudaoud, 2016).

III.2.6.4. domaine animale

Comme pour l'homme, la spiruline renforce aussi les défenses naturelles de l'animal. Elle joue un grand rôle dans le maintien de son système immunitaire, lui permet de lutter contre certaines maladies et agit contre son vieillissement et sa fatigue. Les chiens, les chats, les poissons et les chevaux sont les animaux pour lesquels la spiruline est couramment utilisée (Casal, 2019). Chez les chevaux, sa consommation est très courante pendant la phase de croissance, de compétition ou de convalescence. Selon Casal, (2019), les bons éleveurs de poules n'hésitent pas à ajouter de la spiruline à leur alimentation. C'est une pratique de connaisseur qui participe à la ponte d'œuf d'une qualité nettement supérieure. La spiruline est utilisée en tant que bio-stimulant respectueux de l'environnement, de la santé des hommes et des animaux (Aghofack-Nguemezi *et al.*, 2015).

III.2.6.5. domaine agricole

La spiruline fait partie des algues bleu-vert et les algues sont utilisées depuis longtemps comme des engrais (Vonshak, 2002). Il a été rapporté que les algues contiennent des niveaux élevés de minéraux, de vitamines, des acides aminés essentiels, des hydrates de carbone non digestibles et fibres alimentaires (Jiménez et Goni, 1999). Actuellement, l'utilisation traditionnelle des algues comme amendement a laissé place à l'utilisation de farines et d'extraits liquides à base d'algues. Alors que les engrais solides améliorent les propriétés physiques, biologiques et chimiques du sol, les extraits liquides interviennent à différents stades de la production végétale en agissant sur la germination des graines, la croissance et la résistance des plantes, le rendement des cultures, la qualité et la conservation des récoltes. Récemment, il a été montré que des extraits d'algues vertes et rouges (*Corallina mediterranea* et *Jania rubens*) présentaient des effets bénéfiques sur la germination (El-Sheekh et El-Saied, 2000).

L'extrait d'algues marines est l'un des composés antistress efficace qui est un bio-stimulant utilisé en tant que conditionneur de sol pour améliorer la croissance des plantes (Hurtado *et al.*, 2009). Plusieurs études ont révélé les avantages des extraits d'algues sur les plantes tels-que l'amélioration de la performance des cultures et le rendement ainsi que l'amélioration de la résistance aux stress biotiques et abiotiques (Norrie et Keathley, 2006; Eyra *et al.*, 2008). Les fertilisants à base d'extraits d'algues marines contiennent des carbohydrates et d'autres matières organiques qui améliorent la fertilité du sol et sa capacité de rétention (Crouch et Van Staden, 1993).

Chapitre 4

CHAPITRE IV. MATÉRIEL ET MÉTHODES

IV.1. Objectif

Le haricot est une légumineuse qui occupe une place considérable dans l'économie, l'agriculture et la sécurité alimentaire. La production de cette culture peut être limitée par des maladies et des ravageurs, ce qui exige l'apport d'importantes quantités de pesticides et fertilisants chimiques, chose qui peut compromettre la qualité nutritionnelle des fruits produits et nuire à l'environnement. Dans le cadre de la recherche sur de nouveaux procédés en phyto-protection, la biofertilisation offre une certaine potentialité de bioprotection par, l'utilisation de nouvelles formulations de stimulateurs de défenses naturelles

Cette étude visait à déterminer les effets biostimulants de l'extrait de la spiruline *Spirulina platensis* sur l'expression végétative du haricot vert *Phaseolus vulgaris* L. et ses retombées sur la dynamique et les paramètres démographiques du puceron noire de la fève *Aphis fabae* Scopoli, (1763) (Hémiptera / Aphididae).

IV.2. Matériel d'étude biologique

IV.2.1. Obtention du matériel végétale

IV.2.1.1. Présentation de la chambre de culture

Notre expérimentation a été menée au jardin botanique situé au Quartier de Bab El Akouas la ville de **MÉDÉA**, dans une serre de culture contrôlée appartenant à l'association de l'environnement et du milieu vert de Médéa (Figure IV.1). La serre a une superficie de 24 m² (6 m x 4 m). Durant toute la période l'expérimentation l'enceinte expérimentale enregistrait une température axillant entre 25 et 35°C avec une humidité relative de l'aire de 40 à 50 %.



Figure IV.1. Présentation de la Serre de culture (Originale, 2022).

IV.2.1.2. Obtention des plantules du haricot

Les expérimentations a été menées sur des plantules du haricot vert *Phaseolus vulgaris* L., variété naine « El Jadida ». C'est une variété à croissance déterminée, avec un cycle de végétation court 90 à 120 Jours, appartenant au groupe des haricots mange-tout et destinée à la consommation en frais. Cette variété à été choisis en raison de sa précocité et sa vigueur. Avant utilisation, les graines ont subi un premier bain dans l'eau de javel pendant cinq minutes afin de les désinfecter et éliminer les impuretés. Elles sont ensuite rincées plusieurs fois à l'eau distillée pour éliminer toute trace de chlore.

Les graines du haricot sont imbibées dans l'eau pendant 5 h, par la suit ces graines ont été trempées dans les différentes dilutions de l'extraits de la spiruline (5%, 10% et 15%) pendant 30 min et les témoins dans de l'eau distillée. Les graines, sont déposées dans une boîte en plastique pour la pré-germination pendant 5 jours (Figure IV.3 a et b).

Dès l'émergence de la radicule, les grains sont été plantés dans des alvéoles en plastiques remplies de tourbe stérilisée à raison deux graines par cellule. Au stade 2 à 3 feuilles, les plants ont été soigneusement repiqués dans des pots en plastiques remplis d'un mélange de sable, de sol et de la tourbe (1:1:1) préalablement stérilisé dans une étuve pendant 24 h à une température de 180°C (Figure IV.3. c, d et e). Les plantules sont irriguées régulièrement durant toute la période de l'essai.



Figure IV.2. Stérilisation du substrat (Originale, 2022)

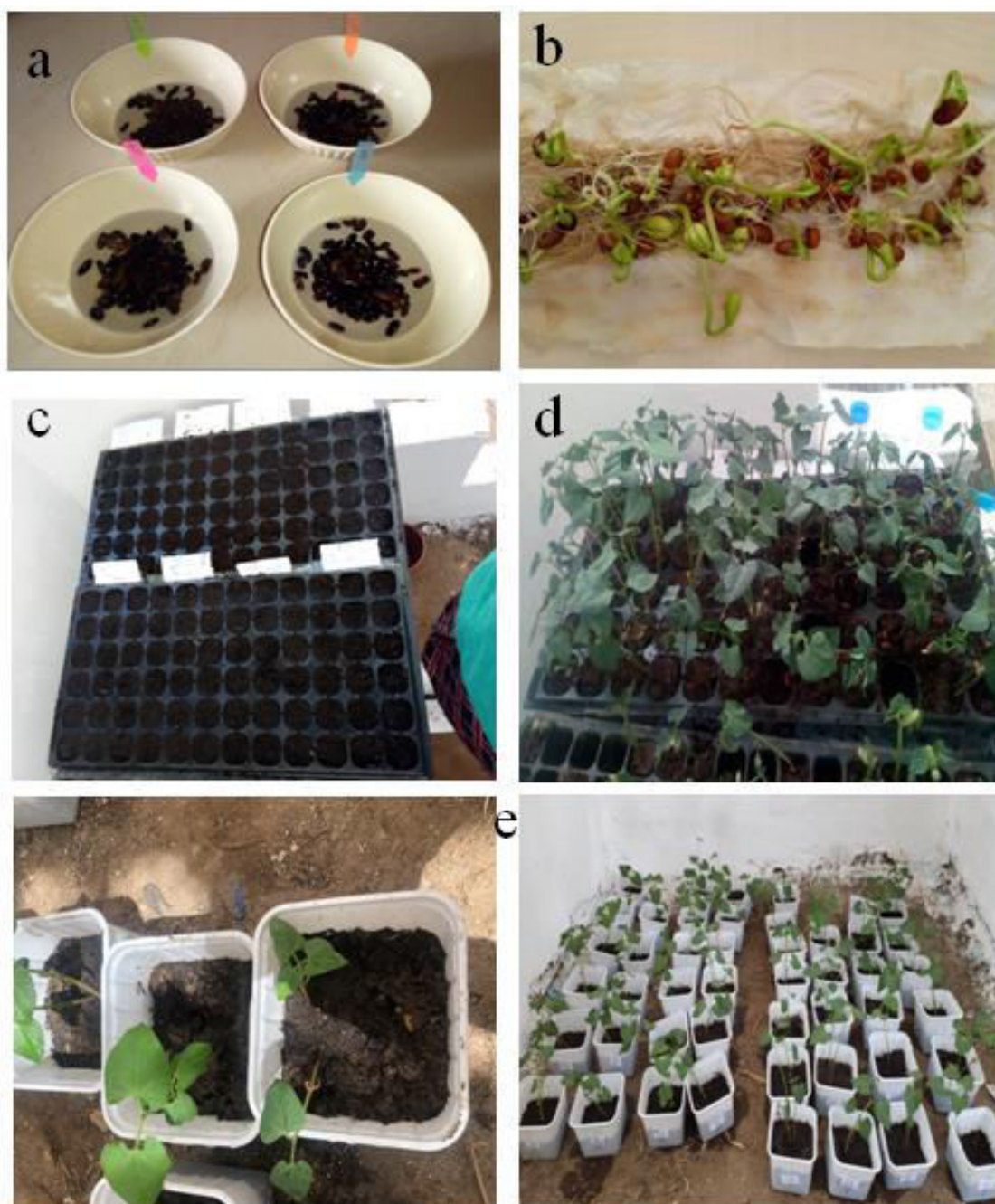


Figure IV.3. Présentation de la Serre de culture (Originale, 2020).

A: trempage des graines dans les différentes dilutions ; b: Pré-germination; c et d: Plantation dans des alvéoles; e: Transplantation.

IV.2.2. Obtention des populations infestantes du puceron noir de la fève *Aphis fabae*

Les plantules de haricot au stade 4 feuilles sont infestées par des plantes de fève contenant le puceron noir *Aphis fabae* Scopoli, (1763) (Hémiptera / Aphididae). Ces dernières ont été fournies par un agriculteur de la région de Blida. Les insectes ont été collectés à différents stades. Au niveau de la serre de culture, nous avons procédé à l'infestation par la mise en place de ces plantes infestées sur les plantules de haricots sains pour faciliter et uniformiser l'infestation (Figure IV.4).



Figure IV.4. Plante de haricot infesté par *Aphis fabae* (Originale, 2022).

IV.2.3. Obtention du biofertilisant

Le matériel biologique utilisé dans ce travail est une micro-algue bleue verte: *Spirulina platensis* (Nostocales / Oscillatoriacées). Il s'agit d'une cyanobactérie microscopique, filamenteuse et multicellulaire ayant une forme hélicoïdale. La longueur moyenne du filament comprenant 5 à 7 spires, est de 250 μm et le filament spiral à un diamètre voisin de 10 μm (Vu Thi Nguyet *et al.*, 2017). La souche nous a été aimablement fournie en culture dans des flacons de 500 ml, sous des conditions de culture bien précis par la ferme pilote de la wilaya de Tamanrasset.

IV.2.3.1. Culture de la spiruline et ses conditions

L'expérimentation a été menée au laboratoire de la faculté des sciences, Département des sciences de la vie et de la nature de l'Université Dr YAHIA Farès (Médéa).

La souche de la *Spirulina* est cultivée sous les conditions de laboratoire, les cultures sont réalisées dans les Erlens-mayers de 500 ml et 1000 ml, dans une chambre contrôlée (Figure IV.5.). Nous avons démarré notre expérience avec un volume de 400 ml de la culture mère de la spiruline, auquel nous avons ajouté un volume 200 ml de milieu de culture Zarrouk afin d'obtenir 600 ml de solution qui par la suite répartie en entre les Erlens-mayers. La culture de *Spirulina platensis* a été lancée le 06/03/2022.

La densité est de 1,14 g/L. La densité optique est mesurée à une longueur d'onde de 630 nm, à l'aide d'un spectrophotomètre. Les échantillons ont été prélevés chaque jour

pour mesurer la densité optique (DO), détermination de la productivité et le taux de croissance spécifique. La culture est maintenue dans des conditions d'éclairement, de température et d'un débit d'air identique.

L'éclairage permanent a été assuré à l'aide d'une lumière blanche par une lampe fluorescente d'intensité lumineuse de 6000 lux. A l'aide d'un luxmètre portable; l'intensité lumineuse a été contrôlée dans la plage comprise entre 2500 et 3500 lux. L'intervalle entre l'éclairage et l'obscurité est 12 heures et cela est assuré par une prise programmable (Ould Bellahcen et *al.*, 2013).

La température est maintenue à une valeur optimale de 32°C à l'aide de thermostats réglables (Ould Bellahcen et *al.*, 2013). La spiruline ne commence à croître d'une manière appréciable qu'au-dessus de 20°C. La vitesse de croissance est maximale entre 35 et 37°C. Au-delà de cette température, on risque d'avoir une destruction de la culture (Florent, 2017). La spiruline peut survivre dans un milieu froid (jusqu'à -5°C). Les brusques variations de température sont néfastes pour la Spiruline.

L'agitation a été assurée par barbotage d'air à l'aide de pompes à air type d'Aquarium pendant 12 heures par jour avec un débit de 18 l. h⁻¹.j⁻¹. 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).

Le PH optimum d'une culture fluorescente varie de 9,5 à 10 (Fox, 1999). Le PH a été mesuré par un PH-mètre.

IV.2.3.2. Milieu de culture

Les cultures sont réalisées sur un milieu synthétique décrit par Zarrouk en 1966. Il s'agit d'une solution de sels minéraux et d'eau. Ce liquide doit apporter à la spiruline tous les éléments chimiques nutritifs qui lui sont nécessaires (Tableau IV.1). Il s'agit de milieux très minéralisés riches en carbonate de sodium (Na₂CO₃) ou bicarbonate de sodium (NaHCO₃), d'une source d'azote fixé et d'autres minéraux. Ce milieu est peu propice à la croissance d'autres végétaux, et d'autres formes de vie au vu de son pH fortement alcalin. Actuellement, de nombreux pays ont mis en place des fermes à spiruline grâce à la synthétisation du milieu de culture. Le plus connu et utilisé (milieu standard) est le milieu de Zarrouk (Zarrouk 1966 *in* Florent, 2017).

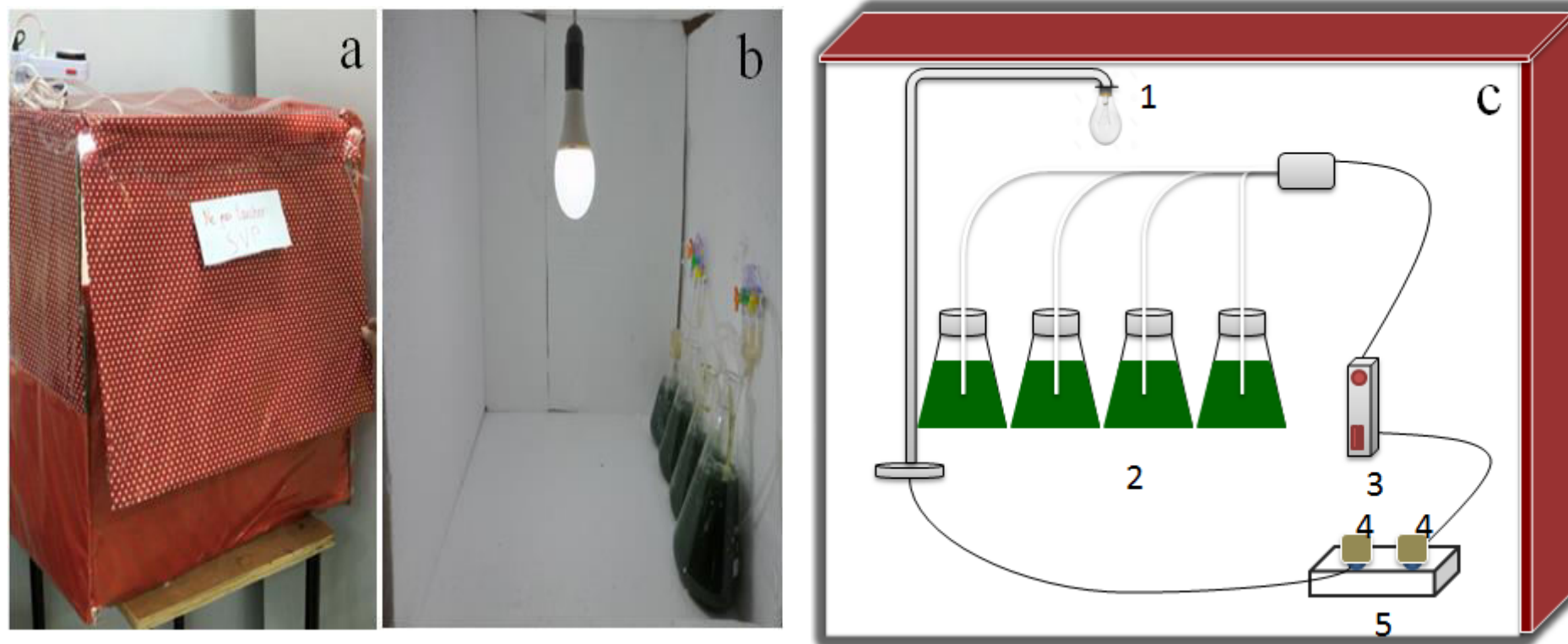


Figure VI.5. Culture de la spiruline dans les conditions expérimentales (Originale, 2022).

A: La chambre a l'extérieur; b: La chambre a l'extérieur; c: Dispositif expérimental.

1: Source lumineuse; 2: Erlenmeyers contiennent de la spiruline; 3: Pompe à air de type d'aquarium; 4: prises programmables pour la lampe et la pompe; 5: prise électrique

Tableau IV. 1. Composition chimique du milieu Zarrouk (Zarrouk, 1966)

Composés	Concentration (g/L)
Hydrogénocarbonate de sodium(NaHCO_3)	16.80
Phosphate dipotassique (K_2HPO_4)	0.50
Nitrates de sodium (NaNO_3)	2.50
Sulfate de potassium (K_2SO_4)	1.0
Chlorure de sodium (NaCl)	1.0
Sulfate de magnésium ($\text{MgSO}_4, 7\text{H}_2\text{O}$)	0.20
Chlorure de calcium (CaCl_2)	0.04
Sulfate de fer ($\text{FeSO}_4, 7 \text{H}_2\text{O}$)	0.01
Acide éthylène diamino tétracétique (EDTA)	0.08

A 1L de la composition chimique de milieu Zarrouk ci-dessus, on a ajouté 1 ml de chacune des solutions d'oligo-éléments A5 et B6 (Tableau II.2; Tableau II.3). Les réactifs doivent être dissouts dans l'eau distillée. A 1L de la composition chimique de milieu Zarrouk (Tableau IV.1.), nous avons ajouté 1 ml de chacune des solutions d'oligo-éléments A5 et B6 (Tableau II.2; Tableau II.3). L'agitation du milieu est assurée par agitateurs magnétiques à fin que les réactifs se dissolvent. Le milieu synthétique est ajusté à $\text{pH} = 9 \pm 0,5$ par addition de NaOH. Le milieu obtenu a été récupéré dans un flacon stérile, ensuite conservée dans le réfrigérateur pour une utilisation ultérieure.

Tableau IV.2. Composition chimique de la solution A5 (Zarrouk, 1966).

Composés	Concentration (g/L)
Acide borique (H_3BO_3)	2.86
Chlorure de manganèse ($\text{MnCl}_2, 4 \text{H}_2\text{O}$)	1.81
Sulfate de zinc ($\text{ZnSO}_4, 7 \text{H}_2\text{O}$)	0.222
Sulfate de cuivre ($\text{CuSO}_4, 5 \text{H}_2\text{O}$)	0.079
Oxyde de molybdène (MoO_3)	0.015

Tableau IV.3. Composition chimique de la solution B6 (Zarrouk, 1966).

Composés	Concentration (g/L)
Vanadate d'ammonium (NH_4VO_3)	0.02296
Alun de chrome ($\text{K}_2\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_4, 24 \text{H}_2\text{O}$)	0.096
Sulfate de nickel ($\text{NiSO}_4, 7 \text{H}_2\text{O}$)	0.04785
Tungstate de sodium ($\text{Na}_2\text{WO}_4, 2 \text{H}_2\text{O}$)	0.01794
Sulfate de titane ($\text{Ti}_2(\text{SO}_4)_3$)	0.04
Nitrate de cobalt ($\text{Co}(\text{NO}_3)_2, 6 \text{H}_2\text{O}$)	0.04398

IV.2.3.3. Contrôle de l'état physiologique de la culture

L'odeur, la couleur et l'aspect ont été surveillés quotidiennement pour vérifier l'état physiologique de la spiruline.

L'identification de la pureté a été déterminée à l'aide d'un microscope optique (Figure IV.6), a pour but de:

- vérifier l'état de culture
- Avoir une idée sur l'étape de croissance
- Mettre en évidence la mobilité
- Faire une approche sur la morphologie

Concernant l'aspect des filaments, plusieurs cas peuvent se présenter (Goulamabasse, 2018):

- Des filaments cassés, pouvant être dus soit par une agitation brutale du milieu de culture, soit par une lumière en excès, soit par un manque de potassium.
- Une spiruline de petite taille peut être le résultat d'une croissance trop rapide ou d'un pH (et/ou salinité) trop élevé.
- Par contre, un manque de fer entraîne des filaments anormalement longs

La croissance de la spiruline a été mesurée quotidiennement à partir de sa densité optique DO en utilisant spectrophotomètre UV à 630 nm. La dilution de la spiruline elle a été faite lorsqu'elle atteignait sa DO 2,5g/L avec le milieu de culture Zarrouk.

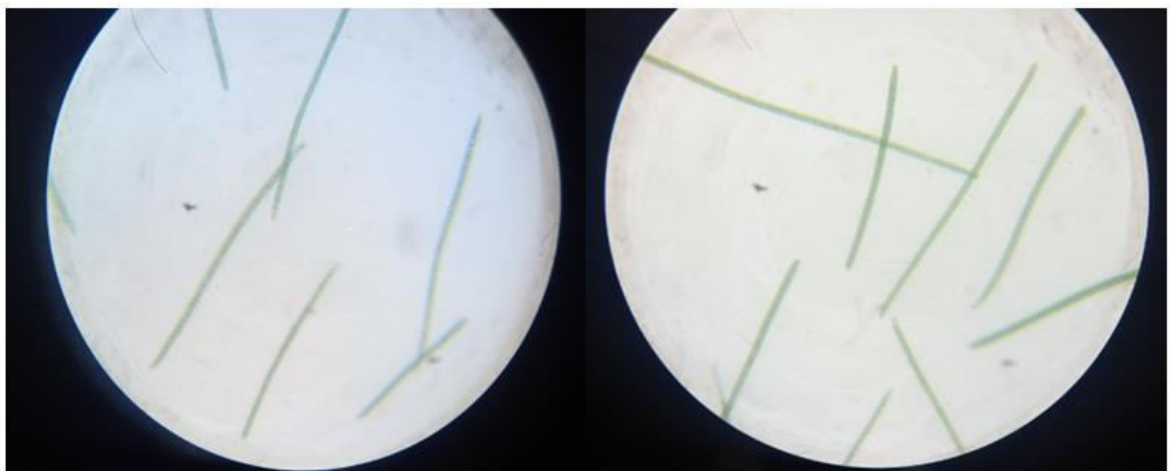


Figure IV.6. Spiruline vue au microscope (Originale, 2022)

IV.3. Méthodes d'étude

IV.3.1. Préparation de l'extrait aqueux de spiruline *Spirulina platensis*

L'extraction a été effectuée selon le protocole décrit par Shima *et al.* (2017). Pour préparer de l'extrait, 1 L de *Spirulina platensis* cultivée a été prélevée à la fin de la phase exponentielle (2,5 g/l). La solution prélevée est centrifugée pendant 20 min à 3000 t/min à température ambiante, filtrée sur papier filtre de 11 micromètre, par la suite le résidu est lavé deux fois avec de l'eau distillée et congelé à -20 °C jusqu'à utilisation (Figure IV.7).

Une macération aqueuse a été effectuée où 1 g de poudre de spiruline congelée a été additionné à 1 L d'eau distillée. L'échantillon a été agité vigoureusement puis stérilisé dans l'autoclave pendant 20 min. Après stérilisation la suspension a été refroidi et conservée à -5°C jusqu'à l'utilisation ultérieure (Figure IV.7). Pour évaluer le pouvoir biostimulateur de l'extrait, trois dilutions ont été préparées: 5%, 10% et 15% soit 50 ml, 100 ml et 150 ml respectivement de l'extrait pure ont été dissoutes dans 1 L d'eau distillée ensuite agitée vigoureusement (Shima *et al.*, 2017). Deux modes d'administration ont été appliqués à savoir l'application foliaire et absorption racinaire. Les expériences sont réalisées dans des conditions contrôlées. Le suivi temporaire des plantes a duré 2 Mois.

IV.3.2. Dispositif expérimental et application des traitements

Les différentes dilutions d'extrait de la spiruline *Spirulina platensis* ont été appliquées sur les plantules de haricot *Phaseolus vulgaris* L. infestées par le puceron noir de la fève *Aphis fabae*. Le dispositif expérimental est composé 96 plants expérimentales relatives aux six traitements à raison de 12 plants par traitement (application foliaire avec trois dilutions 5 %, 10% et 15%, absorption racinaire avec trois dilutions) et aux deux témoins (un témoin foliaire et un autre racinaire avec l'eau courante) (Figure IV.8). Les différents traitements sont apportés par deux voies, la voie foliaire et la voie racinaire. L'application foliaire a été réalisée par un pulvérisateur d'une capacité de 1000 ml alors que l'application racinaire a été réalisée par récipient de 400 ml afin d'administrer le même volume à toutes les plantes du haricot. L'apport des extraits est renouvelé chaque 10 jour durant toute la période d'étude. Avant chaque apport des biofertilisants, trois plants sont prélevés de chaque bloc afin d'évaluer l'effet des biofertilisants sur le haricot *Phaseolus vulgaris* et sur le puceron noir de la fève *Aphis fabae*.

L'estimation de la toxicité de différents apports de l'extrait de la spiruline sur les individus d'*A. fabae* a été évaluée chaque semaine durant toute la période de suivi. A partir des blocs obtenus, nous avons prélevés 5 feuilles sur trois plantes de chaque bloc pris au hasard. Les feuilles sont placées dans un sac en plastique portant toutes les informations nécessaires aux différents apports. Les stades biologiques d'*Aphis fabae* ont été identifiés sur la base des caractéristiques morphologiques externes à l'aide d'une loupe binoculaire au grossissement (8×10).

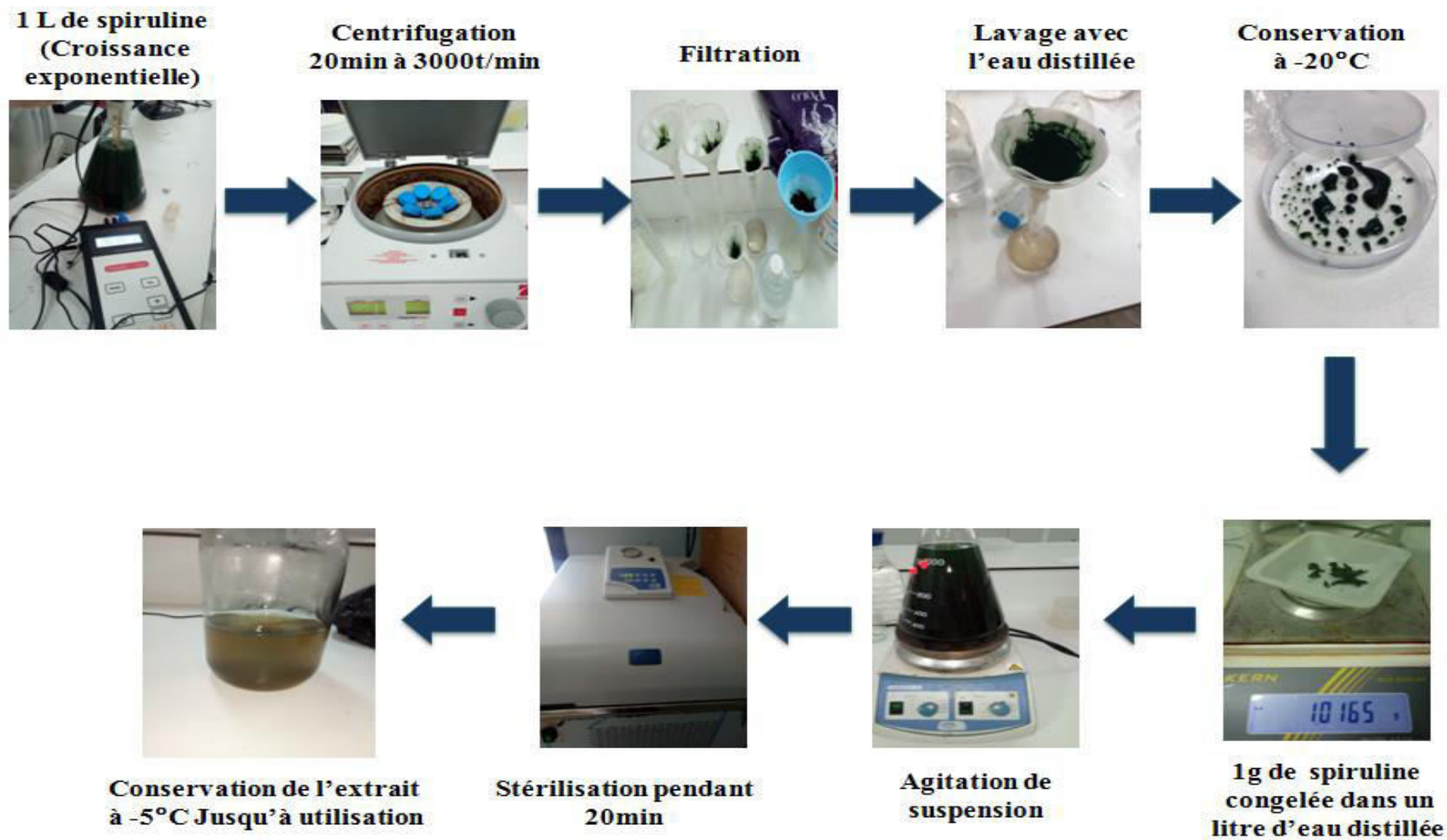


Figure. IV.7. Protocole de la préparation de l'extrait de la spiruline (originale, 2022)

Afin d'estimer les paramètres démographiques, trois plantes prises au hasard chaque bloc, dont nous avons gardé une nymphe et un adulte par plante (Tahriri Adabi *et al.*, 2010 in Tchaker, 2018). Après traitement, la nymphe et l'adulte sur chaque plantes ont été vérifiés hebdomadairement et leur survie a été enregistrée au niveau des différents blocs expérimentaux. La présence des exuvies a été adoptée pour déterminer la période de la mue. Quant les nymphes se transforment en adultes, un suivi a été mené pour estimer la survie et la reproduction. Nous avons pris la précaution d'enlever toutes les larves néonates des feuilles après les avoir comptabilisées (Tahriri Adabi *et al.*, 2010 in Tchaker, 2018). Ces observations se sont maintenues jusqu'au 45 jour après application des traitements.



Figure. IV.8. dispositif expérimental des traitements appliqués (Originale, 2022).

IV.3.3. Estimation des paramètres morphologiques des plants du haricot

Les données relatives aux paramètres de croissance et de développement ont été collectées sur chaque plante de haricot.

- **Estimation de la croissance journalière des plantes du haricot**, la longueur de chaque plant a été mesurée chaque jour durant les huit semaines de l'étude au niveau des blocs expérimentaux (Safiddine, 2012).
- La croissance journalière est estimée par la formule suivante:

$$CJ=100*(Lf-Li)/Li/Tj$$

Où:

- Lf: longueur final;
- Li: longueur initial;
- Tj: tempe journalière d'expérience au cours de traitement

- **Estimation de la longueur des tiges principales**, nous avons suivi l'évolution de développement des tiges principales (tallage).

- **Estimation de la longueur des racines** a été mesurée à l'aide d'une règle graduée à partir du collet une fois par semaine.

- **Les biomasses ou le poids frais des tiges et des racines** exprimées en gramme a été effectuée à l'aide de la balance de précision.

- **Le nombre des feuilles** a été comptabilisé pour chaque plante pour chaque traitement.

- **Les paramètres de fructification** ont été déterminés par le temps mis du repiquage à la formation des premières fleurs (TRFPF) en jours.

IV.3.4. Evaluation de l'abondance des formes biologiques d'*Aphis fabae*

L'abondance représente le nombre d'individus des différents stades biologiques d'*Aphis fabae*. Les différents stades biologiques (larves, adultes ailés et aptères) ont été observés sous une loupe binoculaire.

IV.3.5. Estimation de la fécondité d'*Aphis fabae*

La fécondité est évalué par le rapport du nombre de larve au nombre d'adultes, selon la formule suivante (Tchaker, 2018):

$$F = \frac{NL}{NF}$$

NL : nombre de larves

NF : nombre de femelles

IV.3.6. Estimation des paramètres démographiques d'*Aphis fabae*

Les paramètres démographiques tels que le Taux de reproduction net (R_0), le Taux d'accroissement (r_m), le Taux de multiplication (λ), le Temps de génération moyen (T) et le Temps de doublement (D_T) ont été calculés selon les formules standards Carey (1993 in Tchaker, 2018).

IV.4. Analyse statistique

L'analyse statistique a concerné l'évaluation de l'effet de biofertilisant à base d'extrait de la spiruline *Spirulina platensis* sur les paramètres de croissance des plantes de haricot *Phaseolus vulgaris* et ses retombées sur la fluctuation temporelle et les paramètres démographiques des populations de puceron noir de la fève *A. fabae*.

Les analyses de la variance sont faites sur des moyennes homogènes adoptées sur la base d'un coefficient de variance (C.V. <15%). L'ensemble des tentatives ont été répétées au minimum trois fois. Les résultats, présentés sous forme de courbes ont été réalisés par le logiciel Microsoft Excel.

L'analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée, afin d'apercevoir l'assemblage variétale dans les relations entre les traitements apportés et l'expression végétative et la sévérité de puceron. Les analyses suscitées sont réalisées par le logiciel Past ver. 1,37.

La description statistique des tendances de la variation temporelle des différents paramètres (Croissance, abondance.....) sous l'effet des différents traitements ont été établies par une présentation en BoxPlot réalisées par logiciel XLSTAT.

Lorsque le problème est de savoir si la moyenne d'une variable quantitative varie significativement selon les conditions (Types de bio-fertilisants, mode d'administration, etc...), il est préconisé de réaliser une analyse de variance. Les comparaisons des moyennes été réalisées par analyses de la variance (one-way ANOVA) et à l'aide du test F pour les variables suivant la loi normale. L'analyse de la variance type GLM a été adoptée pour déterminer les différences significatives ($p \leq 0,05$). L'analyse statistique des données a été effectuée à l'aide du logiciel SYSTAT vers. 12.

chapitre 5

CHAPITRE V. RESULTATS

Les résultats relatifs à l'effet des extraits de la spiruline du sur l'état phytosanitaire et sur la croissance du haricot vert *Phaseolus vulgaris* sont présentés dans ce chapitre

V.1. Evaluation de l'effet de l'extrait de la spiruline *Spirulina platensis* sur les paramètres de croissance du haricot vert *Phaseolus vulgaris* L.

V.1.1. Evolution de l'effet de l'extrait de la spiruline sur la croissance cumulative des plantes du *Phaseolus vulgaris* L.

L'évolution hebdomadaire de la croissance aérienne du haricot a été étudiée sous l'effet du mode d'apport des différentes doses d'extrait de la spiruline (Figure V.1.).

Après avoir procédé à cette application, on constate que l'ensemble des traitements apportés ont montré une augmentation remarquable de la croissance cumulative du haricot vert par rapport au témoin. La forte dose (15%) de l'extrait de la spiruline démontre un effet favorable sur la longueur aérienne des plantes par rapport aux autres doses appliquées (10% et 5%). L'évolution temporelle de la croissance cumulative montre un effet moins remarquable des extraits de la spiruline apporté par application foliaire par comparaison aux extraits apporté par absorption racinaire (Figure V.1 a. et b.).

Les résultats, montrent que la croissance des plants traités est beaucoup plus favorisée que celle des plants témoins (Figure V.1 a. et b.).

La présentation graphique en Box Plot des données expérimentales est avancée dans le but d'évaluer la fluctuation de la croissance cumulative des plantes du haricot sous l'action des différentes doses d'extrait de la spiruline (Figure V.2.). À partir des résultats du test ANOVA, nous observons que le facteur dose enregistre un effet hautement significatif sur la croissance des plantes traités (Test ANOVA: $p=0,000^{***}$; $p<1\%$) (Figure V.2.a et b).

Le test Post-Hoc, indique l'existence de 3 groupes homogènes proportionnels aux paliers d'activité stimulatrice des extraits de la spiruline. Le premier palier est remarquable chez les populations exposées à la forte dose (15%), présentant le taux de croissance le plus fort, affiliées au groupe homogène (a) alors que le dernier palier est signalé chez le témoin, présentant le taux de croissance le plus faible, associé au groupe homogène (b) (Figure V.2.a.).

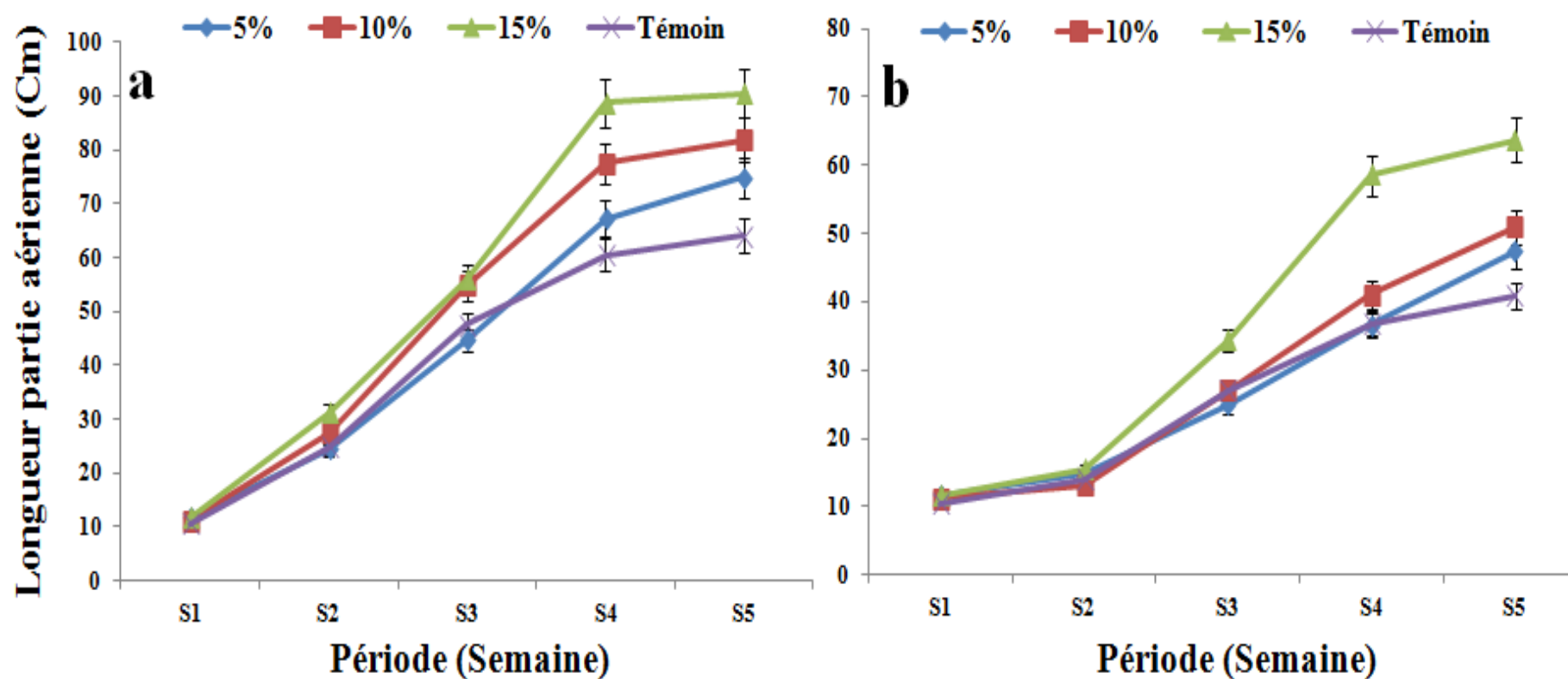


Figure V.1. Effet des différents modes d'application de l'extrait de la spiruline sur la croissance des plants du haricot *Phaseolus vulgaris* L.
A : Absorption racinaire; **b:** Application foliaire

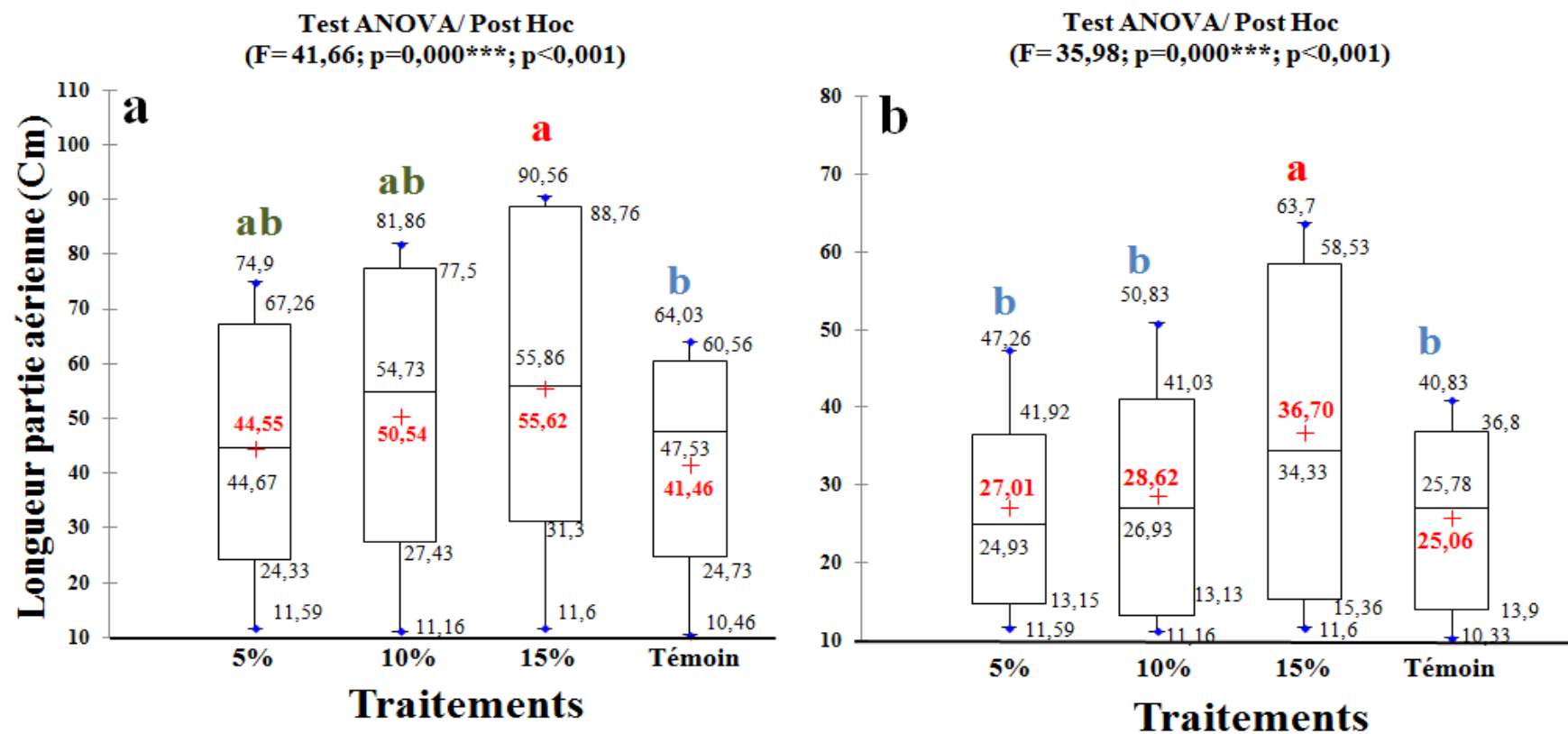


Figure V.2. Evaluation de l'efficacité des différents modes d'application des extraits de la spiruline sur la croissance aérienne des plants du haricot vert
A : Absorption racinaire; b: Application foliaire

L'activité stimulatrice se trouve influencer par la dose de l'extrait, et par conséquent elle paraît obéir à un gradient positif: **Témoin** ($Q_1=13,9$, $Q_2=25,78$, $Q_3=36,8$: Groupe homogène **ab**) < **dose 5%** ($Q_1=13,15$, $Q_2=24,93$, $Q_3=41,92$: Groupe homogène **ab**) < **dose 10%** ($Q_1=13,13$, $Q_2=26,93$, $Q_3=41,03$: Groupe homogène **ab**) < **dose 15%** ($Q_1=15,36$, $Q_2=34,93$, $Q_3=58,53$: Groupe homogène **a**) (Figure V.2.b).

Par ailleurs, les résultats de la croissance cumulative exposent une expression végétative plus importante chez les traités par absorption racinaire que chez les traités par application foliaire (Figure V.2.a et b).

Les extraits de la spiruline utilisés ont contribué dans l'augmentation de la croissance cumulative du *Phaseolus vulgaris* d'une manière très significative en comparaison avec le témoin (Test G.L.M.: $p=0,001^{***}$; $p<0,001$) (Figure V.3.). Cependant les extraits apportés par absorption racinaire semblent plus efficace.

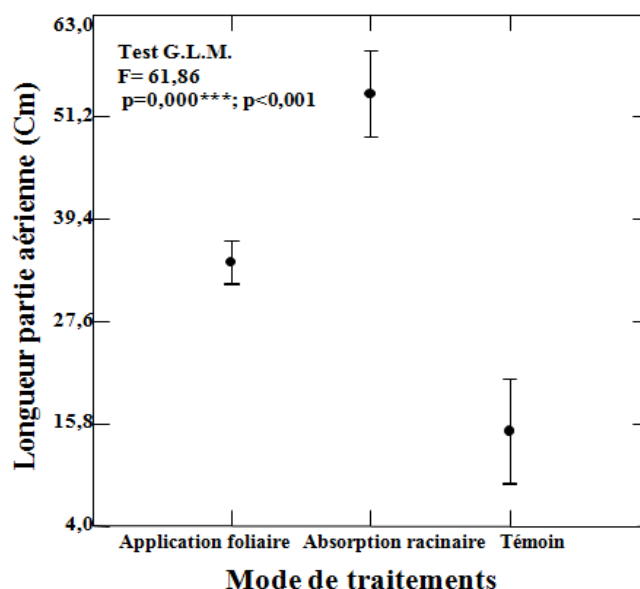


Figure V.3. Etude comparée de l'effet des extraits de la spiruline sur la croissance cumulative du haricot

V.1.2. Evolution de l'effet des extraits de la spiruline sur la croissance racinaire du *Phaseolus vulgaris* L.

La figure 4, présente l'effet des différentes doses des extraits de la spiruline sur la croissance racinaire des plants de haricot vert. Les résultats reportés dans la figure V.4., révèlent que le facteur dose signale un effet significatif sur la croissance racinaire des plants traités en comparaison au témoin ($p<0,05$) (Figure V.4.a et b). Cependant les résultats (Figure V.4.), révèlent que la croissance racinaire des plants traités est plus importante que celles des plants témoin. Les mêmes résultats montrent que les fluctuations de la croissance racinaire sont plus importantes après l'application de traitement.

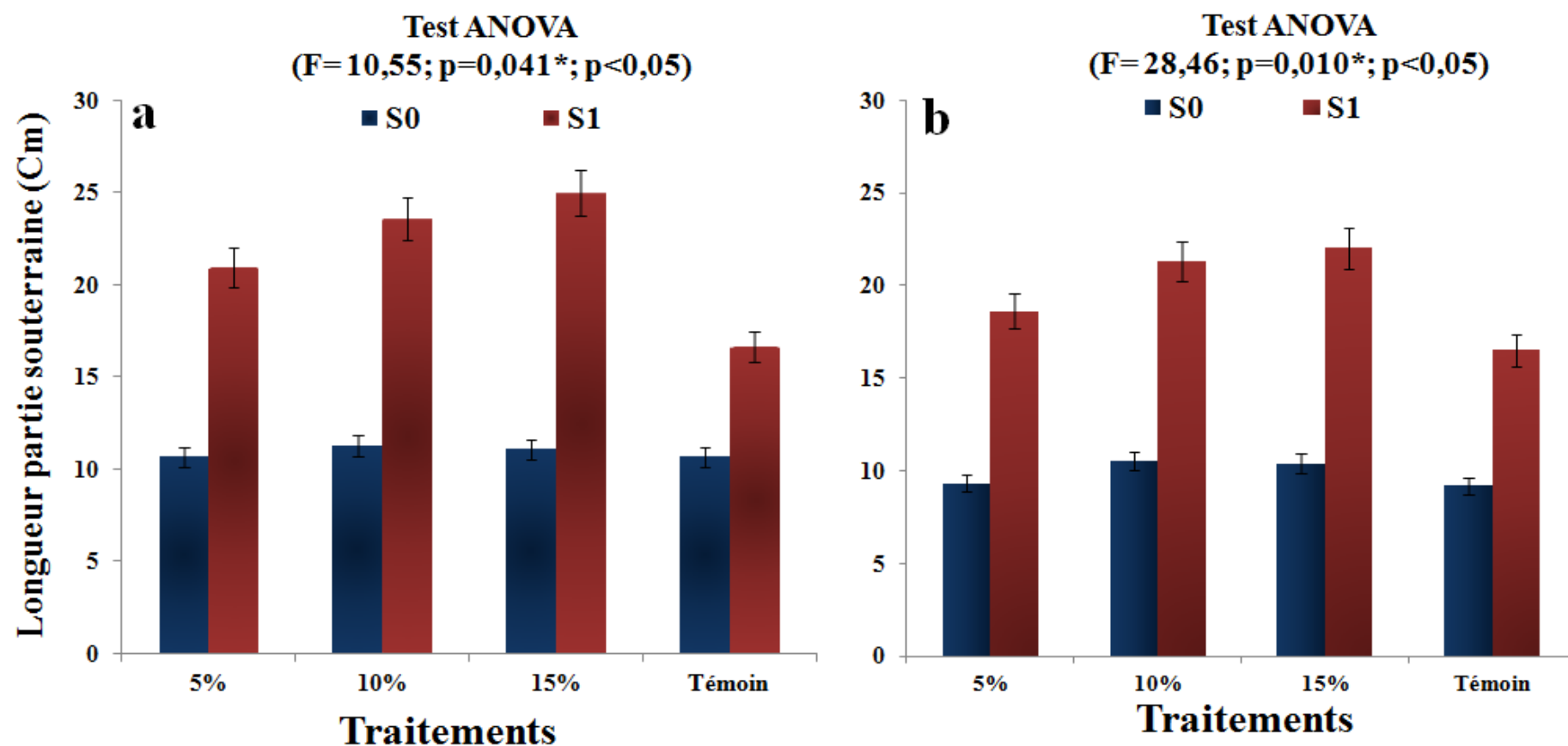


Figure V.4. Evaluation de l'efficacité des différents modes d'application des extraits de la spiruline sur la croissance souterraine des plants du haricot vert
A : Absorption racinaire; b: Application foliaire

La forte dose (15%) de l'extrait de la spiruline démontre un effet stimulateur moyennement important sur la longueur racinaire des plantes traitées par rapport aux autres doses appliquées (10% et 5%) (Figure V.4.a et b).

Les extraits de la spiruline utilisés ont participé dans l'accroissement racinaire du *Phaseolus vulgaris* d'une manière très expressive en comparaison avec le témoin (Test G.L.M.: $p=0,040^*$; $p<0,05$) (Figure V.5.). Les résultats de la croissance racinaire exposent une expression végétative plus importante chez les traités par absorption racinaire que chez les traités par application foliaire.

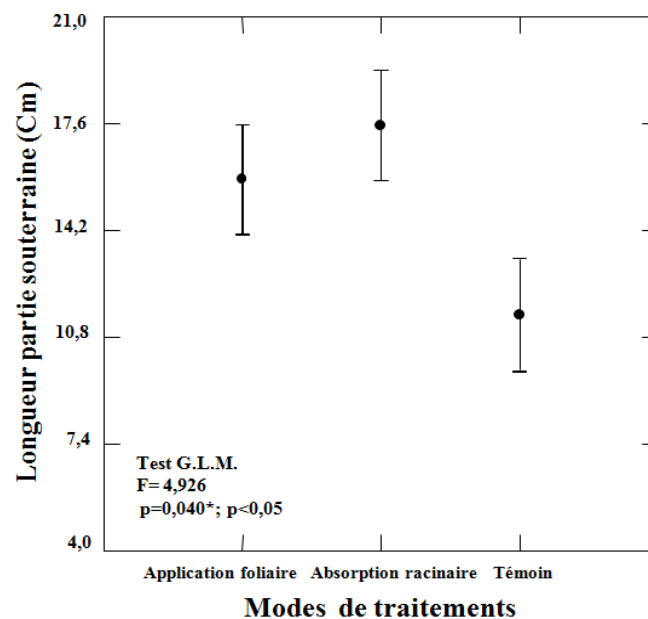


Figure V.5. Etude comparée de l'effet des extraits de la spiruline sur la croissance souterraine du haricot

V.1.3. Evaluation de l'effet des extraits de la spiruline sur le nombre des tiges secondaires du haricot vert

Après avoir procédé à cette application, on constate que l'ensemble des traitements apportés ont montré une augmentation timide du nombre des tiges secondaire des plantes traités du haricot vert par rapport au témoin (Figure V.6.). Les différentes doses des extraits de la spiruline appliquées illustrent un effet comparable sur le nombre des tiges secondaires.

Les extraits de la spiruline utilisés ont participé dans l'augmentation de nombre des tiges secondaires du *Phaseolus vulgaris* d'une manière très expressive en comparaison avec le témoin (Test G.L.M.: $p=0,002^{**}$; $p<0,05$) (Figure V.7.). La lecture des résultats du nombre des tiges secondaires révèlent une expression végétative plus importante chez les traités par absorption racinaire que chez les traités par application foliaire.

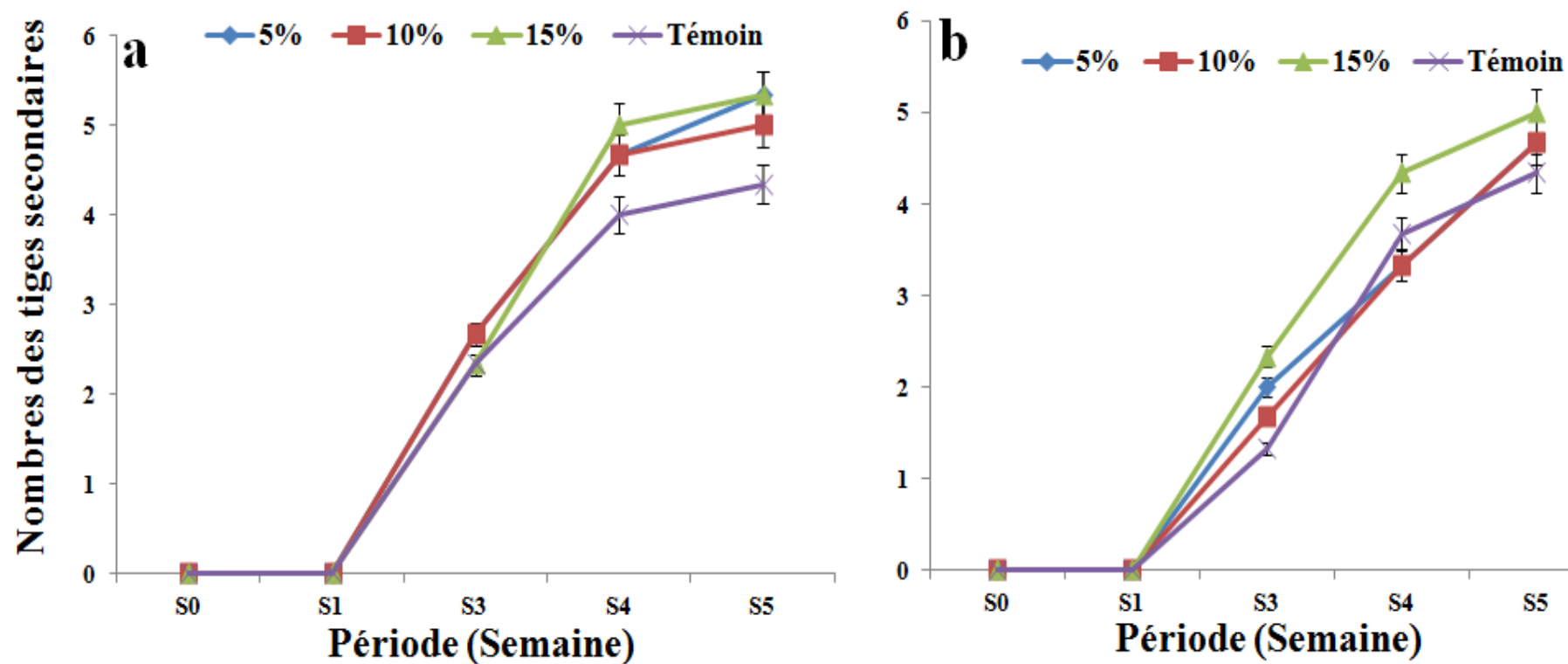


Figure V.6. Evaluation de l'efficacité des différents modes d'application des extraits de la spiruline sur le nombre des tiges secondaires du haricot vert
A : Absorption racinaire; b: Application foliaire

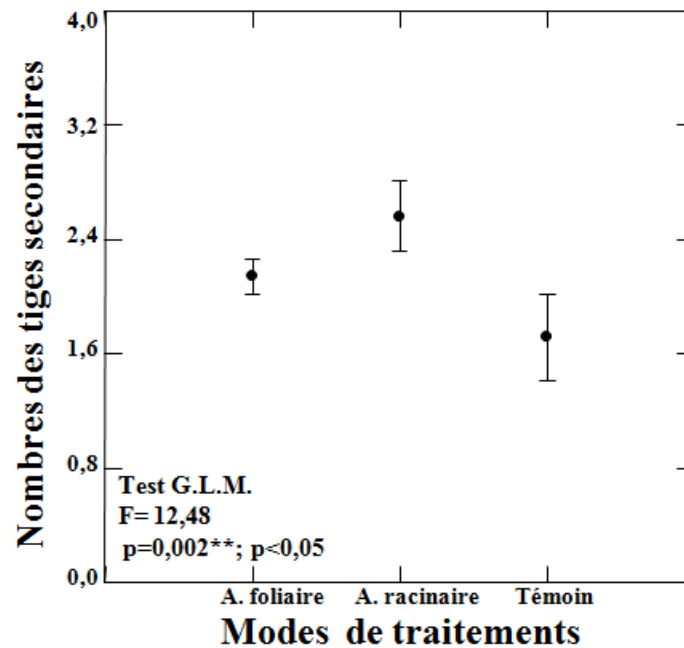


Figure V.7. Etude comparée de l'effet des extraits de la spiruline sur le nombre des tiges secondaires du haricot

V.1.4. Evolution de l'effet des extraits de la spiruline sur la biomasse aérienne du *Phaseolus vulgaris* L.

Nous avons aussi évalué les variations de la biomasse aérienne des plants de haricot *Phaseolus vulgaris* en fonction des différentes doses des extraits de la spiruline. Les résultats reportés dans la figure V.8., révèlent que le facteur dose signale un effet significatif sur la biomasse aérienne des plants traités en comparaison au témoin ($p < 0,05$) (Figure V.8.a et b). Les mêmes résultats montrent que les fluctuations de la biomasse aérienne sont plus importantes après l'application de traitement. Les extraits apportés par absorption racinaire semblent plus efficace. Cependant, la forte dose (15%) de l'extrait de la spiruline démontre un effet stimulateur moyennement important sur la biomasse aérienne des plantes traitées par apport aux autres doses appliquées (10% et 5%).

Les résultats révèlent que le mode d'apport des extraits de la spiruline ne signale pas une différence significative sur la biomasse aérienne des plants de haricot traités en comparaison au témoin ($p = 0,115$; $p > 0,05$) (Figure V.9.). Cependant les résultats, révèlent que la biomasse aérienne des plants traités par l'absorption racinaire est plus importante que celles des plants traitées par l'application foliaire.

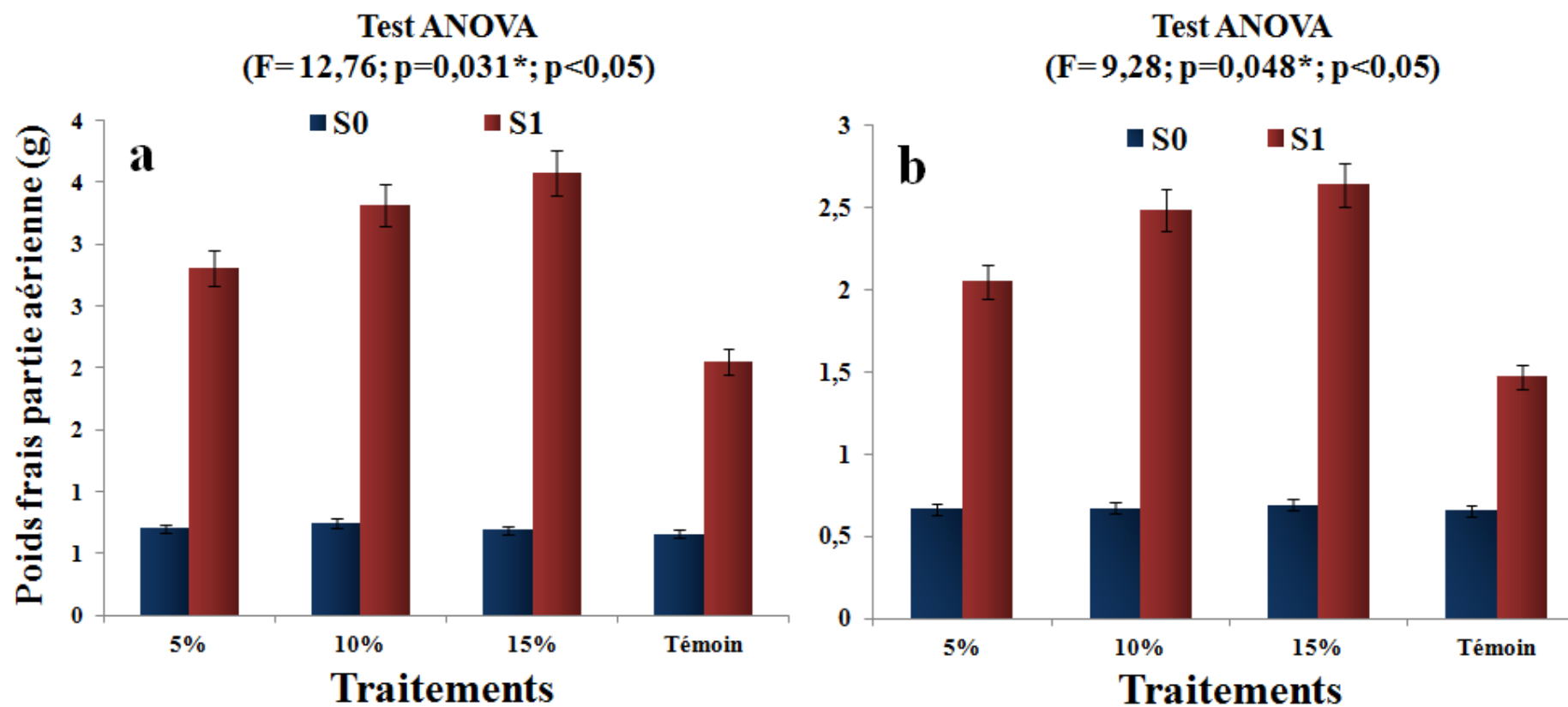


Figure V.8. Evaluation de l'efficacité des différents modes d'application des extraits de la spiruline sur la biomasse aérienne des plants du haricot vert
A : Absorption racinaire; b: Application foliaire

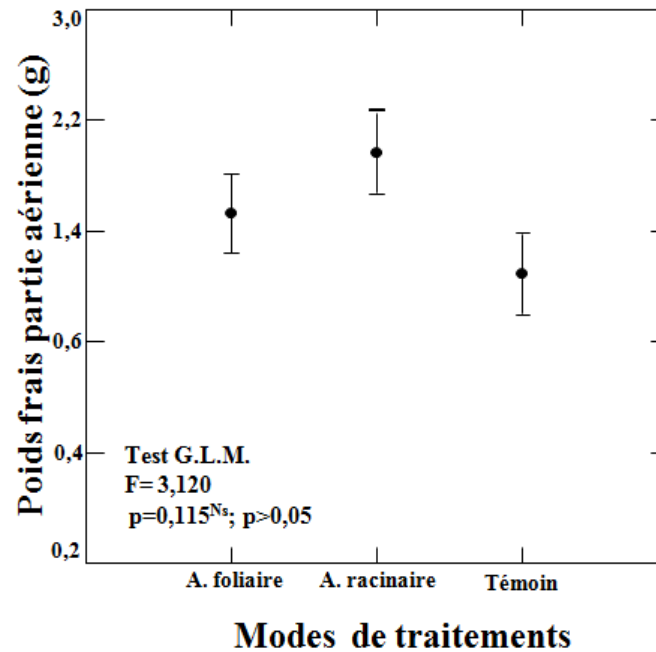


Figure V.9. Etude comparée de l'effet des extraits de la spiruline sur la biomasse aérienne du haricot

V.1.5. Evolution de l'effet des extraits de la spiruline sur la biomasse racinaire du *Phaseolus vulgaris* L.

La variation de la biomasse racinaire des plants de haricot *Phaseolus vulgaris* a été évaluée en fonction des différentes doses des extraits de la spiruline (Figure V.10). Les résultats montrent que la dose affecte significative la biomasse racinaire de haricot ($p < 0,05$). Les mêmes résultats montrent que les fluctuations de la biomasse racinaire sont plus importantes après l'application de traitement. Cependant, la forte dose (15%) de l'extrait de la spiruline démontre un effet exciteur important sur la biomasse racinaire des plantes traitées par apport aux autres doses appliquées (10% et 5%) (Figure V.10 a et b).

Les résultats démontrent que le mode d'apport des extraits de la spiruline ne signale pas une différence significative sur la biomasse racinaire des plants de haricot traités en comparaison au témoin ($p = 0,614$; $p > 0,05$) (Figure V.11.). Les résultats, montrent l'existence d'une gradation positive sur la biomasse racinaire suivant le gradient : témoin < extraits de la spiruline appliqué par voie foliaire < extraits de la spiruline appliqué par voie racinaire (Figure V. 11).

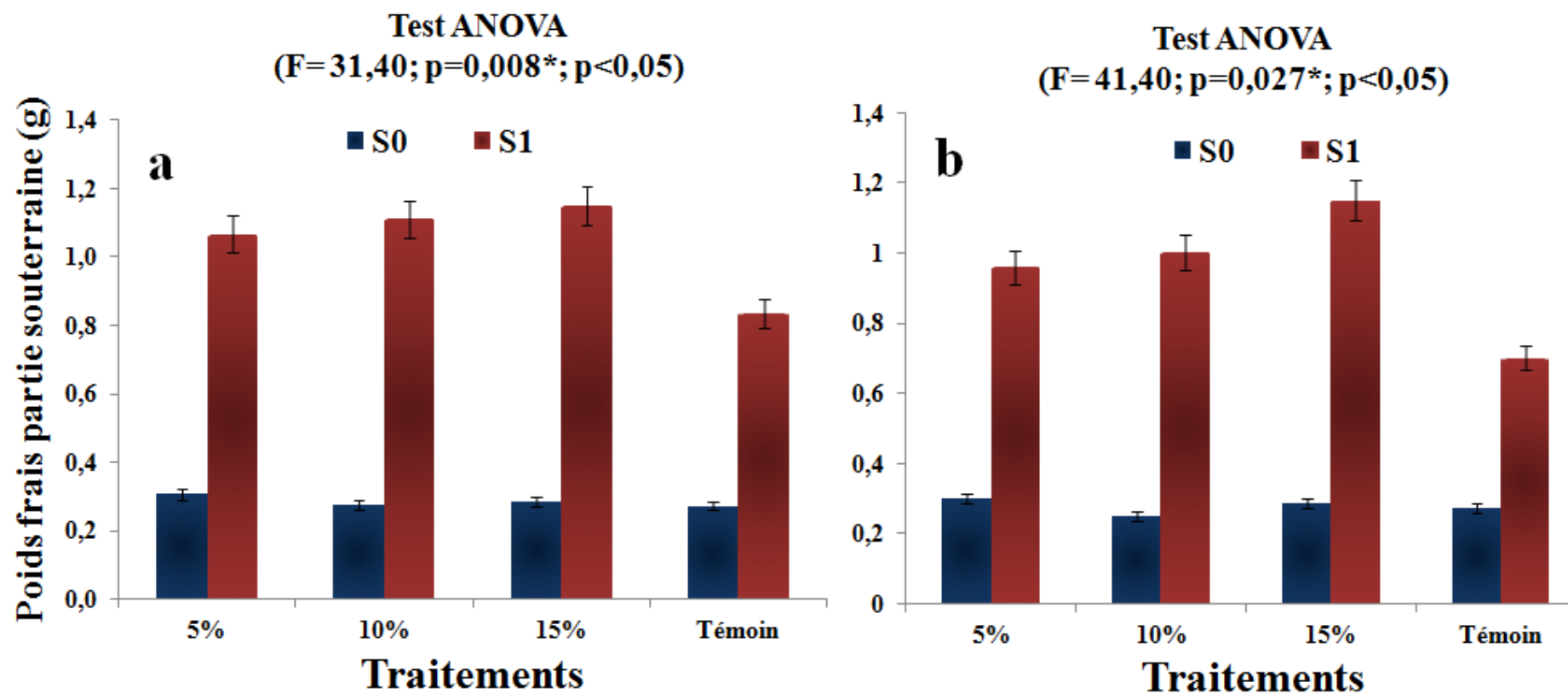


Figure V.10. Evaluation de l'efficacité des différents modes d'application des extraits de la spiruline sur la biomasse souterraine des plants du haricot vert
A : Absorption racinaire; b: Application foliaire

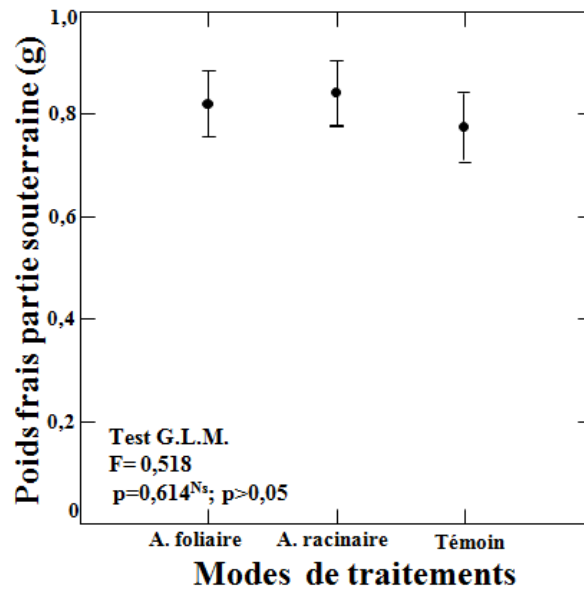


Figure V.11. Etude comparée de l'effet des extraits de la spiruline sur la biomasse racinaire du haricot

V.2. Effet des différents traitements à base de l'extrait de la spiruline sur la réduction des populations du puceron noir de la fève *Aphis fabae*

Cette partie des résultats est consacrée à la présentation des fluctuations des populations du puceron noir d'*Aphis fabae* en réaction à l'application des différents biofertilisants à base de l'extrait de la spiruline.

Les différents extraits appliqués démontrent une action marquée sur la réduction du taux d'infestation des plants du haricot par les individus de puceron noir de la fève *Aphis fabae* en comparaison au témoin. La lecture des résultats illustrent que l'abondance d'*A. fabae* présente une tendance moyennement importante à la baisse chez les blocs traités par comparaison au bloc témoin (Figure V.12 a et b). La forte dose (15%) de l'extrait de la spiruline démontre un effet favorable sur le taux d'infestation des plantes par apport aux autres doses appliquées (10% et 5%).

La présentation graphique en Box Plot des données expérimentales est avancée dans le but d'évaluer la fluctuation de la structure populationnelle de du puceron noir d'*Aphis fabae* sous l'action des différentes doses d'extrait de la spiruline (Figure V.13.).

À partir des résultats du test ANOVA, nous observons que le facteur dose enregistre un effet hautement significatif sur la croissance des plantes traités (Test ANOVA: $p < 5\%$) (Figure V.13.a et b). L'activité stimulatrice se trouve influencer par la dose des extrais, et par conséquent elle paraît obéir à un gradient positif: **Témoin < dilution 5% < dilution 10% < dilution 15%** (Figure V.13.a et b.).

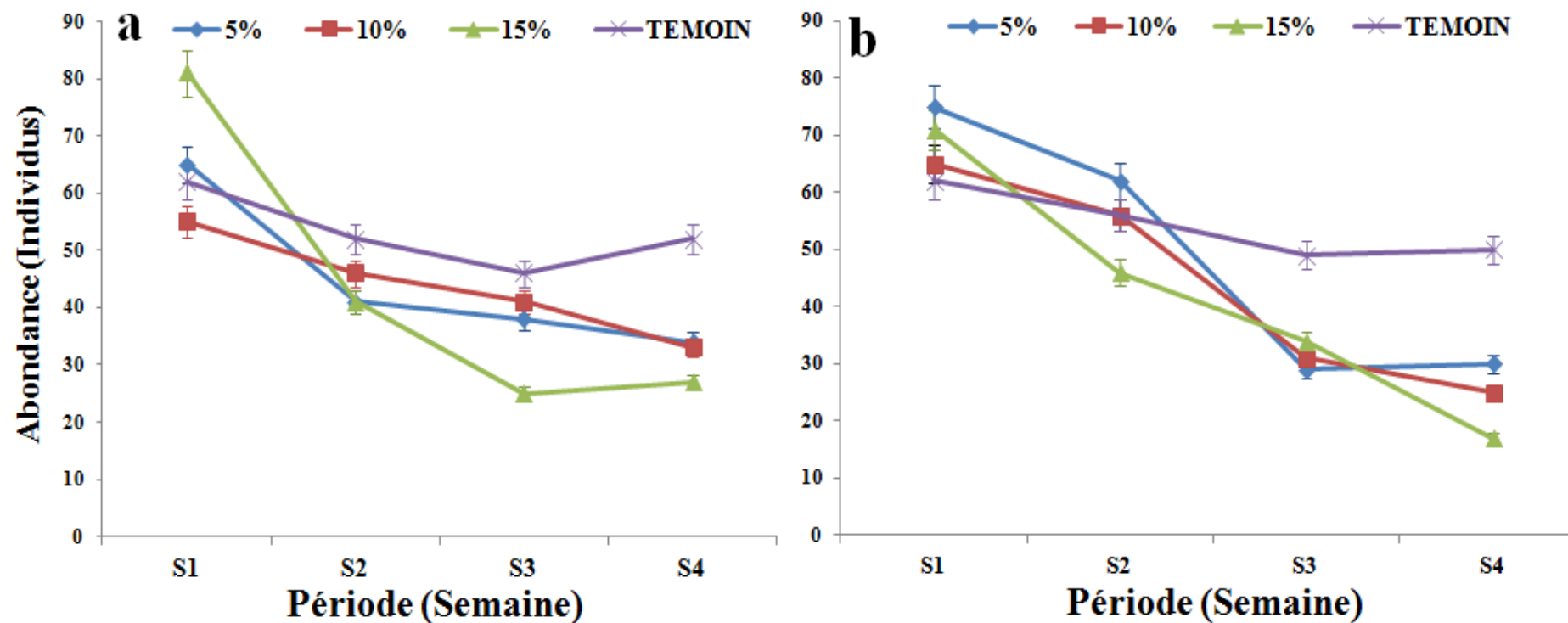


Figure V.12. Evolution temporelle des abondances d'*Aphis fabae* sous l'effet des différents modes d'application des extraits de la spiruline

A : Absorption racinaire; b: Application foliaire

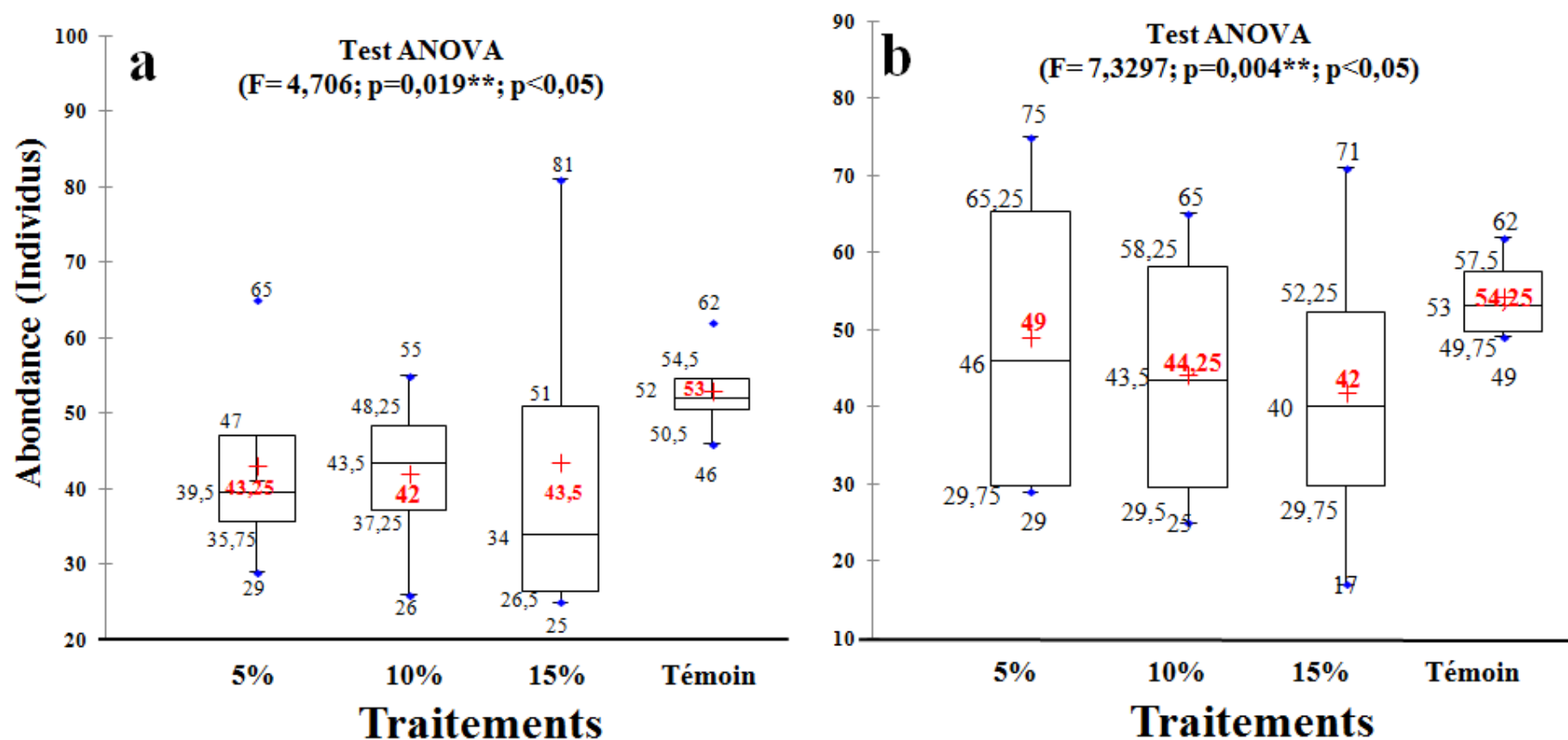


Figure V.13. Evaluation de l'efficacité des différents modes d'application des extraits de la spiruline sur la l'abondance d'*Aphis fabae*
A : Absorption racinaire; **b:** Application foliaire

Le modèle G.L.M. a été appliqué en pour évaluer l'effet strict de la période, des dilutions et du mode d'apport des extraits de la spiruline sur l'abondance d'*A. fabae*. L'ensemble des résultats sont consignés dans la figure V.14. L'efficacité temporelle des traitements appliqués désigne une différence hautement significative entre les abondances d'*Aphis fabae* durant toute la période d'investigation (Figure V.14. a). Les résultats révèlent que les différentes dilutions des extraits de la spiruline ne signale pas une différence significative sur les abondances d'*Aphis fabae* en comparaison au témoin ($p = 0,098^{Ns}$; $p > 0,05$) (Figure V.14.b). Nous signalons que l'effet le plus important est observé sous l'effet de la forte dilution (15%). Les résultats démontrent que le mode d'apport des extraits de la spiruline ne signale pas une différence significative sur la l'abondance d'*Aphis fabae* en comparaison au témoin ($p = 0,194$; $p > 0,05$) (Figure V.14.c). Les résultats, montrent l'existence d'un effet comparable entre les extraits de la spiruline appliqué par voie foliaire et les extraits de la spiruline appliqué par voie racinaire (Figure V. 14. c).

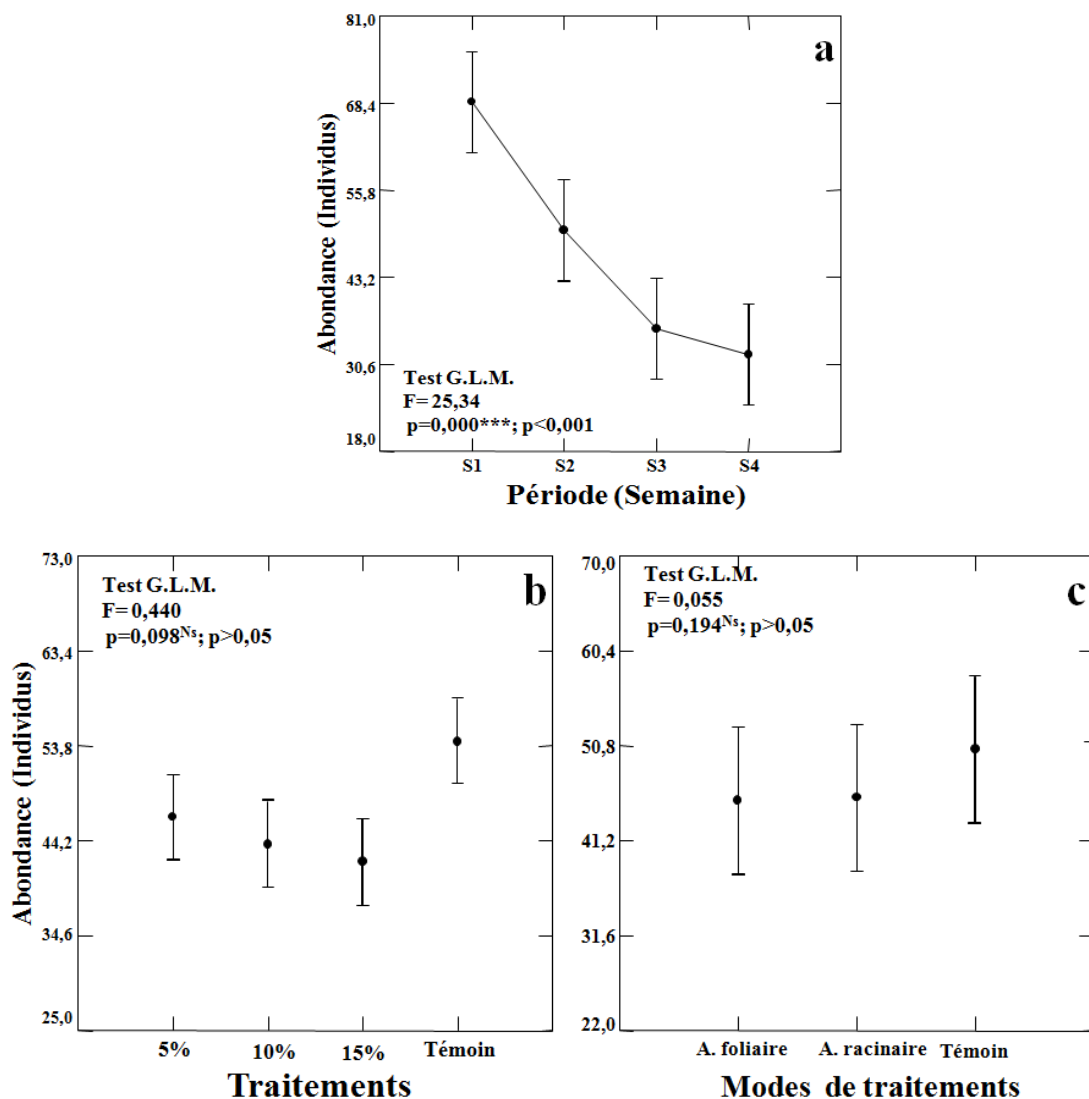


Figure V.14. Etude comparée de l'effet des extraits de la spiruline sur l'abondance d'*Aphis fabae*

chapitre 6

CHAPITRE VI. DISCUSSION GÉNÉRALE

La majorité des systèmes de cultures intensives reposent sur une mécanisation poussée et l'usage d'engrais chimiques, de pesticides, de fongicides et d'herbicides afin de maximiser la production. Ce mode de production assure un rendement important des cultures, permettant ainsi de nourrir une population mondiale de plus en plus nombreuse; mais il met en péril la biodiversité et la santé humaine. La disparition de la biodiversité, la pollution des sols, des nappes phréatiques et des cours d'eau souterrains est en grande partie due à l'utilisation des pesticides et des engrais chimiques (N'Goran Urbain, 2017).

C'est pourquoi les bio-stimulateurs qui sont des matériels biologiques ou leurs extraits ayant des effets bénéfiques sur les propriétés du sol, la croissance et le développement de la plante, la résistance aux stress biotiques et abiotiques (Paradikovic' *et al.*, 2011 in Aghofack-Nguemezi *et al.*, 2015) peuvent être une alternative aux intrants chimiques.

L'objectif de cette étude était d'améliorer la croissance et renforcer la résistance du haricot vert *Phaseolus vulgaris* par l'utilisation des extraits de la spiruline *Spirulina platensis*.

VI.1. Evaluation de l'effet des extraits de la spiruline *Spirulina platensis* sur les paramètres de croissance du haricot vert *Phaseolus vulgaris*

Les résultats relatifs à l'action de biofertilisant sur l'expression végétative, ont prouvé que l'extrait de la spiruline a stimulé rentablement la croissance des plants du haricot. En outre les résultats révèlent que l'extrait de la spiruline apporté par absorption racinaire provoque une stimulatrice importante à la croissance des plants par rapport à l'extrait apporté par application foliaire. Ces résultats nous permettent de déduire que les biofertilisants sont riches en élément minéraux et en hormones, ce qui leurs permis d'augmentent la division et l'élongation des cellules des plantes.

Pour améliorer la fertilité des sols, les micro-algues favorisant la croissance des plantes ont été établies comme des alternatives viables aux engrais chimiques (Bhardwaj *et al.*, 2014). Notre hypothèse est confirmée par plusieurs auteurs qui ont montrés que, les cyanobactéries ont des capacités de fixation de l'azote en tant que biofertilisant pour favoriser la croissance des plantes (Konstantinidou, 2006, Holajjer *et al.*, 2013 ; Genuário *et al.*, 2017 ; Raia *et al.*, 2018 in Hamouda *et al.*, 2019). Ces auteurs estiment que les cyanobactéries contiennent certains composés minéraux nutritifs et certains composés actifs tels que les hormones de croissances (auxines, cytokinines et gibbérellines) qui affectent la santé des plantes (Konstantinidou, 2006, Holajjer *et al.*, 2013 ; Genuário *et al.*, 2017 ; Raia *et al.*, 2018 in Hamouda *et al.*, 2019). D'après la F.A.O. (1981), les cyanobactéries sont des micro-algues, présentent un grand intérêt scientifique et

agronomique, car elles jouent un rôle important dans l'amélioration de la qualité du sol et le développement des plantes.

Parmi ces cyanobactéries on distingue la spiruline *Spirulina Platensis*. Jean *et al.*, (2015) ont rapporté que l'amendement avec la *Spiruline* a amélioré la croissance, le rendement et la résistance de la culture au stress biotique et abiotique. L'effet positif de la *S. plantensis* sur le rendement peut être lié à sa richesse en polypeptides, acides aminés, hormones, acides organiques, vitamines et enzymes (Manrich *et al.*, 2014; Tarraf *et al.*, 2015 in Alves Dias, 2016). Les effets de la poudre et l'extrait de la *S. platensis* proviendraient d'une part de sa composition en acides aminés, en minéraux principalement des oligoéléments, en protéines, en vitamines, en cytokinine et en auxine (Crouh *et al.*, 1992 in Aghofack-Nguemezi *et al.*, 2015, jufri *et al.*, 2016), car ces substances affectent le métabolisme cellulaire des plantes et permettent d'augmenter leur croissance et leur rendement. D'autre part, les polysaccharides que cette poudre contient peuvent contribuer à l'amélioration de la capacité du sol à retenir de l'eau, du développement des racines et des bactéries bénéfiques au sol, de l'absorption des minéraux par les racines (Jeannin *et al.*, 1991 in Aghofack-Nguemezi *et al.*, 2015; N'Goran Urbain, 2017).

Nos résultats sont comparables à ceux obtenus par Nelson et van Staden (1984 in Aghofack-Nguemezi *et al.*, 2015) sur le développement de haricot traité aux extraits liquides d'algues. Ils peuvent s'expliquer par le fait que les extraits aqueux d'algues contiendraient des substances solubles dans l'eau telles que les polysaccharides, les phytohormones comme l'auxine et les minéraux (Crouh *et al.*, 1992 in Aghofack-Nguemezi *et al.*, 2015) qui provoquent une meilleure croissance générale de la plante et un bon rendement. Aghofack-Nguemezi *et al.* (2015), montrent que les extraits et la poudre *Spirulina platensis* ont eu des effets remarquables sur la croissance et le développement de tomate. Les extraits et la poudre *Spirulina platensis* utilisés ont augmenté significativement la taille, le diamètre de la tige, la biomasse des parties aériennes, le nombre des fruits par plante et ainsi la biomasse des fruits. Les mêmes auteurs indiquent que, l'application de la *S. platensis* peut entraîner une réduction du taux d'avortement des fleurs.

Imara *et al.*, (2021), notent que les traitements du sol avec la *S. platensis* a considérablement réduit le pourcentage de fonte des semis avant et après la levée, la gravité des maladies de la pourriture des racines et du flétrissement et a augmenté ainsi le pourcentage de plantes survivantes par rapport à témoin non traité. L'application foliaire d'extrait de spiruline sur les plantes de *fenugrec* augmentait significativement la hauteur de la plante, le nombre de feuilles, le nombre de branches et le poids frais et sec de la plante au stade de croissance végétatif et au stade de floraison. Ces extraits améliorent nettement les teneurs en azote, phosphore et potassium ces plantes (Tarraf *et al.*, 2015). D'après Al Dayel et El Sherif, (2022), l'extrait de spiruline provoque une augmentation dans le rendement en rhizomes et les pigments photosynthétiques chez plantes de *Curcuma longa* par rapport au traitement témoin. Yanni *et al.*, (2020) trouvent que, l'application de spiruline a augmenté la surface foliaire de la plante, la teneur en chlorophylle a, b, en caroténoïdes et en gibbérelline, la hauteur de la plante, les branches fructifères, les capsules

ouvertes/plante, le rendement du coton graine et l'indice des graines après l'égrenage, la longueur des fibres, la finesse et la résistance en comparaison avec les plantes correspondantes non pulvérisées.

VI.2. Evaluation de l'effet des extraits de la spiruline *Spirulina platensis* sur l'abondance du puceron noir de la fève *Aphis fabae*

A partir des résultats obtenu sur la fluctuation des abondances du puceron noir d'*A. fabae* il apparaît nettement une réduction importante d'abondance sous l'effet des extraits de la spiruline *Spirulina platensis* en comparaison au témoin. Cet effet varie selon le mode d'application et la dilution appliquée. Suite aux résultats trouvés on suppose que les extraits appliqués ont stimulé les défenses naturelles de la plante. L'hypothèse apportée rejoint des copieux travaux qui se sont intéressés à l'application des éliciteurs sur les plantes, en activant préventivement ses réactions de défense, conduisait à l'augmentation de sa résistance aux bioagresseurs.

D'après Jean *et al.*, (2015), l'extrait de la *Spiruline* peut participer à la résistance de la culture au stress biotique et abiotique. Selon plusieurs auteurs, le groupe des cyanobactéries produit une variété de métabolites secondaires dans leur milieu de culture (Harrigan et Goetz, 2002). Beaucoup de ces produits naturels ont des activités antibiotiques, algicide, antiviral, fongicide (Harrigan *et al.*, 2001; Mundt *et al.*, 2001). Les cyanobactéries sont capables aussi de synthétiser un grand nombre de composés toxiques comme les nodularines, les microcystines, les neurotoxines (Gaget *et al.*, 2017 in Hamouda *et al.*, 2019).

Les effets des extraits de la spiruline *Spirulina platensis* autant que biostimulateur de défenses naturelles des plantes sont peu documentés, en revanche les seules documentations disponibles ont été consacrées à l'effet des extraits sur les nématodes.

D'après Sharaf *et al.* (2016), *Spirulina Platensis* est connu pour ces propriétés nématocides. Le même auteur signale que, ces cyanobactéries produisent de nombreux composés, tels que l'acétamide, l'hexaméthylène, le méthoxyphényle, le phénol et d'autres, qui sont normalement toxiques pour le nématode à galles. Swain *et al.*, (2017 in Hamouda *et al.*, 2019) ont montrés que les cyanobactéries peuvent également déprimer les agents pathogènes en distrayant la membrane cytoplasmique et en supprimant la création de protéines.

Conclusion

GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Au terme de ce travail consacré essentiellement à l'étude l'effet des extraits de la spiruline *Spirulina Platensis* sur la croissance du haricot *Phaseolus vulgaris* L., (1753) et ses retombées sur l'abondance du puceron noir *Aphis fabae* Scopoli, (1763) dans les conditions contrôlées, il nous a paru intéressant de dégager les principaux résultats auxquels nous avons aboutis.

Les résultats relatifs aux paramètres croissances (Croissances cumulative aérienne, croissance racinaire, biomasse aérienne, biomasse racinaire et nombre des tiges secondaire) des plants de haricot montrent que l'apport des extraits de la Spiruline sous leurs différents modes et dilutions a un effet satisfaisant sur ces paramètres et permettent de mettre en évidence l'effet bio-stimulant des extraits. La croissance moyenne la plus élevée est enregistrée sur les plants traités avec l'extrait de la spiruline à la forte dilution (15%). Cependant, l'extrait de la Spiruline apport par l'absorption racinaire semble plus efficace à l'expression végétative des plants du haricot vert par rapport à l'extrait apporté par l'application foliaire.

Les résultats montrent que, les différentes formes de l'extrait de la spiruline *Spirulina platensis* apportés participent activement dans la régulation des infestations des plants de haricot vert par le puceron noire *Aphis fabae*. Les résultats montrent aussi que la forte dilution affiche le taux le plus faible au terme d'abondabce. Cependant, les résultats, démontrent l'existence d'un effet comparable entre les extraits de la spiruline appliqué par voie foliaire et les extraits appliqué par voie racinaire.

Les résultats obtenus par la présente étude ont montré que de l'extrait de la spiruline *Spirulina platensis* en plus de son action bio-fertilisants, pourrait être un moyen efficace de lutte contre les bio-agresseurs des plantes. Ces biofertilisants donc peuvent contribuer à réduire la fréquence d'utilisation des insecticides de synthèse potentiellement plus toxiques et les intégrer dans des moyens de lutttes respectueuses de l'environnement.

En perspective, il serait intéressant d'évaluer l'effet du biofertilisant sur les paramètres de production de culture et sur les paramètres populationnels et démographiques des bio-agresseurs dans les conditions de plein champ. Il serait important d'utiliser du biofertilisant sous sa version formulée dans un programme de lutte intégrée.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. **Abdelkader F.Z. et Ouadah A., 2016.** Etude de l'activité insecticide des extraits hydro alcooliques de *Ricinus communis* L. et *Sapindus saponaria* L. sur le puceron noire de fève « *Aphis fabae* ». Mémoire de master, université de mostaganem, 56p
2. **ABLAIN-BARRIERE.F.,2016.** Besoins de la plante et gestion du sol.
3. **Aghofack-Nguemezi J., Passannet A. S. et Valère T., 2015.** Effets des extraits ou de la poudre de *Spirulina platensis* et *Jatropha curcas* sur la croissance et le développement de la tomate. *J. Appl. Biosci*, 90:8413 – 8420
4. **Akello J. et Sikora R., 2012.** Systematic acropetal influence of endophyte seed treatment on *Acyrtosiphon pisum* and *Aphis fabae* offspring development and reproductive fitness. *Biological Control*, 61: 215-221
3. **Alabouvette C., et Cordier C., 2018.** Fertilité biologique des sols : des microorganismes utiles à la croissance des plantes. Innovations Agronomiques, INRAE, HAL Id: hal-02058232. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02058232>.
4. **Al Dayel Munirah F., et El Sherif Fadia., 2022.** *Spirulina platensis* Foliar Spraying Curcuma longa Has Improved Growth, Yield, and Curcuminoid Biosynthesis Gene Expression, as Well as Curcuminoid Accumulation. *Horticulture*, <https://doi.org/10.3390/horticulturae8060469>.
5. **Alamri R., Ben Abdallah M., et Ben Hamza A., 2015.** Installation d'une unité de production de biofertilisants. Rapport de séminaire, Institut National Agronomique de Tunisie. <https://www.memoireonline.com/01/16/9399/Installation-d-une-unite-de-production-de-biofertilisants.html>
6. **Alves Dias George; Railene Hérica Carlos Rocha, Lopes Araújo Josinaldo , De Lima José Franciraldo et Wellington Alves Guedes.,2016.** Growth, yield, and postharvest quality in eggplant produced under different foliar fertilizer (*Spirulina platensis*) treatments. *Semina: Ciências Agrárias*,. v. 37, n. 6, p. 3893-3902
7. **Assemien E.F.L., 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. Biochimie [q-bio.BM]. Université de Lyon, Français. ffNNT : 2018LYSE1103ff. fftel-01896147f, 205p.
8. **Banks J., 2007.** Etude de la Spiruline au Palacret, Etudier la Faisabilité de la Mise en Place d'une Filière Spiruline sur le site du Palacret dans les Côtes d'Armor. Manuel, p 10,11.
9. **Barker V. A., 2007.** Handbook of plant nutrition.Ed. *Taylor & Francis Group* CRC press, New York, p652.

10. **Baste Mia B. M. A., 2015.** Nutrition of crop plants. Published by *Nova Science Publishers, Inc.* † New York, 187p.
11. **Bell A., 1994.** La morphologie descriptive et dynamique des plantes à fleurs. Edition. *Masson*, Paris, 340p.
12. **Benchamma H., et Bouacha R., 2020.** Ecophysiologie de la réponse des plantes du haricot *Phaseolus vulgaris* L variété conteneur au stress salin. Mémoire de master, université de blida, 150p.
13. **Ben Hamza H., et Laib A., 2020.** Etude de L'activité insecticide de *Nerium oleander* L contre *Aphis fabae* Scopoli, 1763 (Hemiptera, Aphididae). Mémoire de master, Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi- B.B.A, 22p.
- 14.. **Benton Jones., 2012.** Plant Nutrition and Soil Fertility Manual Second editio, *CRC pressTaylor & Francis Group*, new york,299p.
15. **Benzait H., 2013.** Effet des extraits aqueux des feuilles de *Pergularia tomentosa* L. et *Peganum harmala* L. sur les pucerons noirs *Aphis fabae* Scopoli (1763). Mémoire de master, université de Ghardaïa , 55p.
16. **Bhardwaj D., Ansari M.W., Sahoo RK., et Narendra Tuteja., 2014.** Biofertilizers function as key player in sustainable agriculture by improving soil fertility, plant tolerance and crop productivity. *Microb Cell Fact*,13(66).
<https://microbialcellfactories.biomedcentral.com/articles/10.1186/1475-2859-13-66>
17. **Bhatla Satish C.,et Lal Manju A., 2018.** Plant Physiology Development and Metabolism,Ed.*Springer*, New Delhi, Delhi, India,1251p. ISBN 978-981-13-2022-4 ISBN 978-981-13-2023-1
18. **Blackman R. L., et Eastop V. F., 2007.** Taxonomic issues. In van Emden H.F. and Harrington R., *Aphids as Crop Pests*. CABI Millennium Volume CABI, U.K: 1-29
19. **Boccon-Gibod J., 2014.** Connaître la nutrition minérale des végétaux pour bien fertiliser. *Botanique - Jardins de France*, 631, pp 45-47.
20. **Boisvert K., 2014.** Evaluation du déplacement de modèles d'endophytes dans le maïs et de leur effet sur la photosynthèse. Thèse à Université du Québec, 115p.
21. **Bonnemain J-L., et chollet J-F., 2003.** Biologie et pathologie végétales. L'arsenal phytosanitaire face aux ennemis des plantes. Considérations générales. *C.R.Biologies* 326, pp : 1-7.
- 22.. **Borin A. L. D. C., Ferreira G. B., Ferreira A., Carvalho M., Bogiani J., Sissoko F., Dagbenonbakin G., Koulibaly B., Naïtormaïde M., Fayalo G., Traore K., Amonmide I., Djinodji A. et Di Stéfano J., 2013.** Diagnostique visuel des carences nutritionnelles du cotonnier. Ed., *Embrapa Information*

technologique, Brésil, 44p.

23. **Bouchenafa H., 2020.** Évaluation de l'effet des fertilisants sur la croissance de la tomate et la dynamique de ravageur. Mémoire de Master, Université de Médéa, 88p.
24. **Boudaoud. S., 2016.** L'incorporation de la spiruline sur les qualités nutritionnelles, organoleptiques et technologiques du couscous artisanal. Mémoire de master, Université de Tlemcen, 102p.
25. **Camille B., 2009.** Étude de l'impact de la nutrition azotée et des conditions de culture sur le contenu en polyphénols chez la tomate. Sciences agricoles. Institut National Polytechnique de Lorraine, Français, 260 p. FfNNT : 2009 INPL050Nff, fftel-01748724f.
26. **Casal A., 2019.** l'Aliment Idéal et le plus Complet de Demain. Site web, www.spirulinefrance.fr.
27. **Chaboussou F., 1981.** Les plantes malades des pesticides. Base nouvelle de prévention contre maladies et parasites. Ed. *DEBARD*, Paris, 200p.
28. **Chaichi W., 2011.** Effet d'un lombricompost sur la qualité phytochimique et la fitness du puceron noir de la fève dans les conditions contrôlées. Mémoire de Magister, Blida ,179p.
29. **Charaf M., 2015.** Contribution a l'étude de l'auto écologie et de la variabilité génétique intra spécifique chez *Ammophila arénaria*. (L.) Dans la region ouest de l'Algerie. thèse de doctorat, Université Sidi bel abbes, Algérie.198p.
30. **Charpy L., Langlade M.J., et Alliod R., 2008.** La Spiruline peut-elle être un atout pour la santé et le développement en Afrique ? Institut de Recherche pour le Développement. Marseille, France. 49 p
31. **Chaux C.L., et Foury C.L., 1994.** Production légumière, tome III, légumineuses potagères, légumes fruits. Ed. *Lavoisier*, Paris.854p
32. **Chekkal S., et Derradji S., 2015.** Evaluation de l'effet insecticide de deux huiles essentielles formules (*thymus vulgaris* et *eucalyptus globulus*) en combinaison avec un bioadjuvant *silena fuscata*) sur *aphis fabae* (homoptera (aphididae) sur haricot en comparaison avec un produit chimique. mémoire de master, université de b.b.a , 68p
33. **Chenafi I., 2016.** Des projets prometteurs qui souffrent du manque de coordination. Journal *El Wattan* ,13 Avril 2016,Algérie, <https://www.elwatan.com/pages-hebdo/etudiant/des-projets-prometteurs-qui-souffrent-du-manque-de-coordination-13-04-2016>.
34. **Cherif H., 2014.** Amélioration de la croissance du blé dur en milieu salin par inoculation avec *Bacillus* sp. et *Pantoea agglomerans* isolées de sols arides. Thèse de Doctorat, Université de Sétif, Algérie, 162p.

35. **Chibani H.R., 2017.** Sélection et caractérisation des bactéries solubilisant le phosphate isolées du sol salin dans l'ouest algérien: effet sur la promotion de la croissance du blé (*Triticum* sp.). Thèse de doctorat, Université de Mostaganem, 125p
36. **Dedryver C.A., 2007.** Pucerons : des dégâts et des hommes. *Biofutur*, 279: 22-25.
37. **Delaire M., 2005.** Variations de la capacité d'absorption minérale par les racines du jeune *Acer pseudoplatanus*, L. (Acéracées) consécutives à l'histoire nutritionnelle récente et ancienne de la plante. Application à la culture hors sol des végétaux ligneux. Thèse de doctorat, Université d'Angers, Français, 177p.
38. **Dinant S., Bonnemain J-L., Girousse C., et Kehr J., 2010.** Phloem sap intricacy and interplay with aphid feeding. *C. R. Biologies*. 333: 504-515.
39. **Dogimont C, Bendahmane A, Chovelon V, et Boissot N., 2010.** Host plant resistance to aphids in cultivated crops: Genetic and molecular bases, and interactions with aphid populations. *C. R. Biologies*. 333: 566-573
40. **Doumenge F., Durand-Chastel H., et Toulemont A., 1993.** Spirulina, algue of life. Bulletin de l'Institut Océanographique de Monaco. Numéro spécial 12.Monaco. Musée Océanographique. 222 p
41. **Dupont D., Evoliconseil., et Souchon I., 2014.** Structure des Aliments et Effets Nutritionnels, Edition Quae, RD 10, 78026 Versailles Cedex. P 451.
42. **Dupont F., et Guignard J.L., 1989.** Haricot nain (Bulletin des variétés). Edit. Masson. Collection : Abrégés pharma. Paris. 510P.
43. **Fageria Nand Kumar., Virupax C. Baligar., et Charles Allan Jones, 2011,** Growth and Mineral Nutrition of Field Crops., Ed. CRC press, New York, 574p ISBN-13: 978-1-4398-1696-7
44. **FAO., 1981.** Blue-green algae for rice production. *FAO Soils Bulletin*. Rome, 1981
45. **Ferhat W., et Lakehal., 2019.** En vue de l'obtention du diplôme de Master Académique Filière : Biologie cellulaire et moléculaire Spécialité : Toxicologie Fondamental et appliqué. Mémoire de master. université de El-Oued. 54p
46. **Fetnassi O., 2015.** Etude de l'effet de salinité sur la germination et la croissance de quelques variétés du Haricot (*Phaseolus vulgaris* L.). Mémoire de master, Université de GUELMA, 41p
- 47.. **Fox RD., 1999.** La spiruline: technique, pratique et promesse. Aix-en-Provence: Edisud; 1999.
48. **Franche C., Lindstro-m K., et Elmerich C., 2009.** Nitrogen-fixing bacteria associated with leguminous and non-leguminous plants. *Plant Soil*. 321:35-59.

49. **Fraval A., 2006.** Les pucerons. Insectes 3 n°141, office pour les insectes et leur environnement, France, 2eme trimestre, pp 03-08.
50. **Fruchart S., 2016.** Essais de l'efficacité de différents biofertilisants sur orge de printemps (*Hordeum vulgare*) et prairie naturelle. Université d'Angers p55 <http://creativecommons.org/licences/by-nc-nd/2.0/fr/>
51. **Gage D.J., 2004.** Infection and invasion of roots by symbiotic, nitrogen-fixing rhizobia during nodulation of temperate legumes. *Microbiol Mol Biol.Rev.*68. 2:280-300.
52. **Gantet P., et Verger A., 2002.** Nutrition carbonée. Ed. *Unisciel*. https://uel.unisciel.fr/biologie/module1/module1_ch02/co/module1_ch02_1.html
53. **Gepts P., 1990.** Biochemical evidence bearing on the domestication of *Phaseolus* (Fabaceae) beans. *Econ. Bot.* 44 (suppl.) : 38-38.
54. **Giri Bhoopander. Wu Qiang-Sheng Prasad Ram. et Varma Ajit.,2019.** Biofertilizers for Sustainable Agriculture and Environment, Ed.*Springer*,india,548p
55. **Godin C. et Boivin G., 2002.** Guide d'identification des pucerons dans les cultures maraîchères au Québec. Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2000, révision 2002, 33 pages.
56. **Goulamabasse T. R., 2018.** La spiruline : activités thérapeutiques et son intérêt dans la lutte contre la malnutrition à Madagascar. Thèse doctorat, Univ. Lille, France, 125p.
57. **Guazzelli M. J., Meirelles L., Barreto R., Gonçalves A., Motter C. et Rupp L.C., 2008.** La trophobie pour lutter contre les ravageurs et les maladies. *Agriculture durable à faibles apports externes*; 23(4):16-18.
58. **Guignard J.L., 1998.** Botanique, Ed. *Masson*, 159p.
59. **Habib R.L Pagès MO Jordan T Simonneau M Sébillotte.,1991.** Approche à l'échelle du système racinaire de l'absorption hydrominérale. Conséquences en matière de modélisation,*Elsevier*,22p,
60. **Hamdani D., 2012.** Actions des poudres et des huiles de quelques plantes aromatiques sur les paramètres biologiques de la bruche de haricot, *acanthosceldes obbtectus* Say. (coleoptera: bruchidae). These de Magister . université Mammeri de Tizi-Ozou 97p
61. **Hamouda Ragaa, A.; Al-Saman Mahmoud A., et El-Ansary Mostafa S. M, 2019.** Effect of *Saccharomyces cerevisiae* and *Spirulina platensis* on Suppressing

- Root-knot Nematode, *Meloidogyne incognita* Infecting Banana Plants under Greenhouse Conditions. *Egypt. J. Agronematol.* Vol. 18, No.2, PP. 90-102
62. **Harkat H., 2014.** Appréciation de la nutrition minérale de quelques vignobles de la région de Skikda par la démarche de l'enquête. Mémoire Magister, Univ. Constantine, Algérie, 64p.
63. **Harmel N, Haubruge E, et Francis F .,2010.** Etude des salives de pucerons : un préalable au développement de nouveaux bio-insecticides. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 14(2) : 369- 378.
64. **Hopkins W.G., 2003.** Physiologie végétale. 1re éd., De Boeck & larcier, Université de Bruxelles, France, ISBN 2-7445-0089-5, 514 p
65. **Hubert P., 1978.** Recueil de fiches techniques d'agriculture spéciale à l'usage des lycées agricoles à Madagascar Antananarivo, BDPA.
66. **Hulle M., Turpeau-Ait ighil E., Robert Y., et Monet Y., 1999.** Les pucerons des plantes maraîchères. Cycle biologique et activités de vol. Ed A.C.T.A. I.N.R.A. Paris.
67. **Hurtado AQ., Yunque DA., Tibubos K., et Critchley., 2009.** Use of Acadian marine plant extract powder from *Ascophyllum nodosum* in tissue culture of *Kappaphycus* varieties. *J Appl Phycol* 21 : pp. 633-639.
68. **Imara D.A. ; Zaky, W.H. et Ghebrial, E.W.R, 2021.** Performance of Soil Type, Cyanobacterium *Spirulina platensis* and Biofertilizers on Controlling Damping-off, Root Rot and Wilt Diseases of Moringa (*Moringa oleifera* Lam.) in Egypt, *Egyptian Journal of Phytopathology*. Vol. 49, No. 2, pp 10 – 28 (2021)
69. **Inamuddin Mohd Imran A., Rajender B., et Mashallah R., 2021.** Biofertilizers Study and Impact. 649p
70. **Jean Aghofack-Nguemezi., Schinzoumka Passannet Augustin., et Tatchago Valère., 2015.** Effets des extraits ou de la poudre de *Spirulina platensis* et *Jatropha curcas* sur la croissance et le développement de la tomate. *Journal of Applied Biosciences* 90:8413 – 8420.
71. **Jufri A.F.; Sudradjat et Sulistyono. E.,2016.** Effects of Dry *Spirulina platensis* and Antitranspirant on Growth and Yield of Chili Pepper (*Capsicum annuum* L.). *J. Agron. Indones.*, 44, 170–175.
72. **Kochhar S L., et Sukhbir Kaur Gujral., 2020.** Plant physiology: theory and applications, Ed.Cambridge University Press, New York, 880p, ISBN 978-1-108-48639-2 Hardback ISBN 978-1-108-70771-8 paperback

73. **Laberche Jean-Claude, 2010.** Biologie végétale, Ed. Dundo, Paris, 316p. ISBN 978-2-10-054840-8
74. **Lambert L., 2005.** Les pucerons dans les légumes de serre : Des bêtes de sève. Ed. *Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation*, Québec.
75. **Le Bohec J., Robert Y., Grousson C. et Robic R., 1981.** Les pucerons de l'artichaut. Étude particulière de *Capitophorus horni* Börner et d'*Aphis fabae* Scop. En Bretagne.
76. **Leclant F., 1999.** Les pucerons des plantes cultivées. Clefs d'identification. I- Grandes cultures. Ed. ACTA, INRA. Paris. 64p.
77. **Lecompt B., 1997.** Étude du développement embryonnaire in vivo et in vitro dans le genre *Phaseolus* L. Thèse doct. Sci. Agron. Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux, Gembloux, Belgique , 186 p.
78. **Lekhal S., et Meherhera N., 2017.** L'utilisation des huiles de *Pistacia lentiscus* L. dans la lutte biologique contre le puceron noir de la fève *Aphis fabae*. Mémoire de master, Université de JIJEL, 54p
79. **Leroy P., Capella Q., et Haubruge E ., 2009.** L'impact du miellat de puceron au niveau des relations tritrophiques entre les plantes hôtes, les insectes ravageurs et leurs ennemis naturels. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 13 (2) : 325-334
80. **Lounici S., 2010.** Caractérisation de la spiruline : *Spirulina htam*, optimisation de ses conditions de culture et application industrielle. Mémoire de Magister en Nutrition et transformation des aliments, Université de Blida. 131p
81. **Mansouri L M., 2020.** Etude des effets des facteurs biotiques et abiotiques sur la nodulation chez le haricot (*Phaseolus vulgaris* L.). thèse de doctorat . université de batna ,2 . 72p
82. **Mathelet P., 2018.** Plantes et santé au fil des saisons : Initiation à la phytothérapie. Editions de la Vallée Heureuse
83. **Mengel K., et Kirkby E.A., 1978.** Principles of plant nutrition, Ed. *Intern. Potash Inst.*, Berne, 398p
84. **Mohamed Seghir A., Benkhirdine B. I. et Ben Ammar L., 2020.** culture et production de la spiruline *Arthrospira platensis* dans la region de m'sila et l'extraction de phycocyanine. Mémoire de master, Université de msila, 54p
85. **Morot-Gaudry J-F., Moreau F., Roger F. Prat, Maurel C. et Sentenac H., 2017.** Biologie Végétale - Nutrition et Métabolisme. *Dunod*, pp.242, Sciences Sup, 978-2-10-075887-6. HAL Id: hal-01594667. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01594667>.

86. **Muller .C. B., Williams .I. S., et Hardie .J., 2001.** The Role Of Nutrition, Crowding, and Interspecific Interactions In The Development Of Winged Aphids. *Ecol.Ent*, 26, 330-340p
87. **Norrie, J., et Keathley JP., 2006.** Benefits of *Ascophyllum nodosum* marine-plant extract applications to “Thompson seedless” grape production. *Acta Hort* 727 , pp.243-247.
88. **N’Goran Urbain F. N., 2017.** Optimisation de la culture de la spiruline en milieu contrôlé : éclairage et estimation de la biomasse. *Optique / photonique*. Université Paul Sabatier – Toulouse III, 2017. Français. NNT : 2017TOU30378. Tel 02013829,144p.
89. **Ould Bellahcen., bouchabchoub.A., Massoui.M., et El yachoui.M.,2013.** Culture et production de *Spirulina platensis* dans les eaux usées domestiques. *Larhyss Journal*, N°14, Juin 2013, pp. 107-122.
90. **Ould El Hadj M.D., 2004.** Le problème acridien au Sahara algérien. Thèse Doctorat., E.N.S.A. El Harrach, Alger. 279p.
91. **Pallardy Stephen G., 2008.** Physiology of woody plants, Ed.:Elsevier Amsterdam,469p,ISBN 978-0-12-088765-1
92. **Pitrat M. et Foury F., 2003.** Histoires de légumes, des origines au XXIe siècle. Edit. INRA, Paris. Pp22-28.
93. **Posten C., et Walter C., 2012.** Microalgal Biotechnology: Integration and Economy. Berlin/Boston. 340 p.
94. **Rabasse. J M., 1985.** Pucerons en cultures protégées, les problèmes posés et les moyens de les contrôler en lutte intégrée. *Phytoma – Défense des cultures*, (234) : 13-18.
95. **Radwan DEM., Lu G., Ali Fayez K., et Younis Mahmoud S .,2008.** Protective action of salicylic acid against bean yellow mosaic virus infection in *Vicia faba* leaves. *Journal of Plant Physiology* , 165: 845-857
96. **Ramdani N.; Kaci y.; Boullla A.; Bellal M.M. et Benalladua S., 2002.** Effet de l'inoculation ou blé dur *Triticum durum* var par *Azospirillum*. *Annales de l’institut National Agronomique El-Harrach*, 23 (1):85-100
97. **Remaudiere G. et Remaudiere M., 1997.** Catalogue des Aphidae du monde, I.N.R.A, Paris, pp. 473p.
98. **Renato de Mello Prado.,2021.** Mineral nutrition of tropical plants,Ed: *Springer*, São Paulo.Brazil, ISBN 978-3-030-71261-7 ISBN 978-3-030-71262-4,349p.
99. **Roger P. et Dreyfus B., 2009.** Contribution des biotechnologies à la sécurité alimentaire : le cas des biofertilisants microbiens. Colloque sur la Sécurité

alimentaire et développement durable, France, 87-109.

100. **Safiddine F., Nebih D., Merah O. et Djazouli Z-E., 2019.** Impact de différents types de vermicompost sur la réduction du nombre de galles de meloidogyne et l'expression végétative des plants de tomate. *Revue Agrobiologia* (2019) **9**(1): 1415-1427
- 101 **Sharaf Abd El-Monem M.A., Kailla Atef M., Attia Mohamed S.,et Nofal Mohamed M.,2016.** Induced resistance in tomato plants against root knot nematode using biotic and abiotic inducers. *J.International Journal of Advanced Research in Biological Sciences*. ISSN: 2348-8069. DOI: 10.22192/ijarbs
102. **Schulze Ernst-Detelef., Erwin Beck., et Klaus Muller-Hohenstein., 2005.**plant ecology Ed.springer,Berlin,692p.ISBN3-540-20833
103. **Sguera S., 2008.** *Spirulina platensis* et ses constituants : intérêts nutritionnels et activités thérapeutiques. Sciences pharmaceutiques. HAL Id: hal-01732214 <https://hal.univ-lorraine.fr/hal-01732214>
104. **Singh. S., Singh BK., Yadav SM., et Gupta AK., 2014.** Potential of biofertilizer's in crop production in Indian agriculture. *Am J Plant Nutr Fertil Technol* 4:33–40
105. **Sonneveld C., 2009.** Plant Nutrition of Greenhouse Crops. Springer Dordrecht Heidelberg London New York, p 431. ISBN 978-90-481-2531-9. DOI 10.1007/978-90-481-2532-6.
106. **Taga S., Vincent K., 2001.** Les extraits d'algues en agriculture vers une meilleure compréhension de leur mécanisme d'action, 8p. <https://docplayer.fr/65607856-Ceva-vthme-les-extraits-d-algues-en-agriculture-vers-une-meilleure-comprehension-de-leur-mecanisme-d-action.html/>
107. **Tahri M., 2018.** Recherche de paramètres liés à la tolérance au sel chez l'haricot (*Phaseolus vulgaris* L.). Thèse de doctorat, université de Mostaganem, 130p
108. **Taiz Lincoln., Eduardo Zeiger., Ian Max Møller., et Angus Murphy., 2015.** Plant Physiology and Development, Ed.Sinauer Associates,U.S.A.888p
109. **Tchaker F.Z., 2018.** étude de l'efficacité globale des biopesticides et des pesticides de synthèses sur les ravageurs des essences forestières et des arbres fruitiers. Thèse de Doctorat, Université de Blida, Algérie, 247 p.
110. **Tarraf s. A., Talaat I. M., El-sayed a. E.-k. B., et Balbaa I. K.,2015.** Influence of foliar application of algae extract and amino acids mixture on fenugreek plants in sandy and clay soils. *J,Nusantara Bioscience*,Giza, v. 7, n. 1, p. 33-37
111. **Uchida.R., 2000.** Plant Nutrient Management in Hawaii's Soils, Approaches for Tropical and Subtropical Agriculture,Ed College of Tropical Agriculture and Human Resources, University of Hawaii at Manoa,

112. **Unicef., 1996.** Spiruline contre la mal nutrition. Ann, Rep. pp. 49-51
113. **Van Emden H. F.,2013.** Handbook of Agricultural Entomology. Ed.wiley-blackwell, UK, ISBN 978-0-470-65913-7
114. **Vessey J.k., 2003.** Plant growth promoting rhizobacteria as bio-fertilizers. Plant Soil, 255: 571-586.
115. **Vonshak A., 2002.** *Spirulina platensis* : Physiology, cell-biology and biotechnology.Ed. Taylor and Francis, 233p, ISBN0-7484-0674-3.
116. **Wiedenhoeft. Alex C.,2006.** Plant nutrition, Ed. Chelsea House,153p. ISBN 0-7910-8564
117. **Yanni Youssef G ., Elashmouny Amany A et Elsadany Abdelgawad Y, 2020.** Differential Response of Cotton Growth, Yield and Fiber Quality to Foliar Application of *Spirulina platensis* and Urea Fertilizer. Asian Journal of *Advances in Agricultural Research*,ISSN: 2456-8864
118. **Zarrouk C., 1966.** Contribution à l'étude d'une cyanophycée: influence de divers facteurs physiques et chimiques sur la croissance et la photosynthèse de *Spirulina maxima* (Setch el Gardner) Geitler, Thèse de doctorat, Faculté des Sciences de l'Université de Paris.
119. **Zombre N., 2006.** Variation de l'activité biologique dans les zipella (sols nus) en zone subsahélienne du Burkina Faso et impact de la technique du zaï (techniques des poquets). *Biotechnol. Agron. Soc. Environ* ; 10 (2), 139 – 148