

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة 8 ماي 1945 قالمة

Université 8 Mai 1945 Guelma

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Sciences de la Terre et de l'Univers



Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de Master Domaine :

Sciences de la Nature et de la Vie

Filière: Sciences Biologiques

Spécialité/Option: Biochimie Appliquée

Département: Biologie

Thème

Analyse Des Composants Bioactifs D'un Microalgue Cas De *Spirulina Arthrospira Platensis*

Présenté par:

M^{elle} MAKHLOUF Nouredine

M^{elle} AOUAOUDA aya

Devant le jury composé de:

Président : Dr . Torche Asma M .C .A Université de Guelma

Examinatrice : Dr . Hamdiken Malika M .C .A Université de Guelma

Encadreur : Dr . Razkallah Zahra . M C B Université de Guelma

Juin 2025

Remercîments

Au nom d'Allah, le Tout Miséricordieux, le Très Miséricordieux, nous reconnaissons humblement que tout effort est vain sans Sa volonté . Louange à Allah qui nous a donné la force, la patience et la persévérance pour mener à bien cette recherche . Que la paix et les bénédictions soient sur Son dernier prophète, Mohammed, que la paix soit sur lui .

Nous remercions sincèrement chaque membre du jury **Dr hamdiken .M et Dr Touche .A** de nous avoir honorés par leur présence et d'avoir accepté de faire partie du comité d'évaluation de notre mémoire .

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude au **Dr Razkallah Zahra**, encadrante de ce travail, pour sa bienveillance, sa disponibilité, sa rigueur scientifique ainsi que pour la confiance qu'elle nous a accordée et tout au long de ce mémoire .

Nous remercions particulièrement le **Dr Doghman** pour son aide précieuse et ses conseils pertinents qui ont grandement contribué à l'avancement de ce travail .

Nos remerciements vont également à **Mme Nassima**, responsable du laboratoire, ainsi qu'à toute l'équipe du laboratoire, pour leur accueil, leur patience, leur aide précieuse et leur soutien constant durant la réalisation de ce travail .

Nous adressons nos vifs remerciements à tous les enseignants et chercheurs qui nous ont accompagnés, guidés, soutenus de près ou de loin dans nos recherches .

Enfin, et surtout, j'exprime ma profonde reconnaissance à ma famille bien-aimée pour son soutien inconditionnel, sa compréhension et ses encouragements constants . Leur amour et leur présence ont été le pilier fondamental de mes réussites . À eux, je dois une reconnaissance éternelle

Merci à tous

Dédicace

Tout d'abord, je remercie Dieu, notre Dieu. Nous remercions sincèrement chaque membre du jury de nous avoir honoré par leur présence et d'avoir accepté de faire partie du comité d'évaluation de notre mémoire .

créateur de m'avoir donné la force, la volonté et le courage afin d'accomplir ce travail modeste .

Je dédie ce travail :

A ma mère **Rouabhia Zahia**, la source de tendresse et la lumière qui guide mes routes et qui m'emmène aux chemins de la réussite, pour tous ses sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie .

A mon père **Aouaoudar abhe** que je le remercie énormément pour ces efforts, ses conseils et sa surveillance .

A mon chère frère **Ramzi**, pour ton amour, ton soutien inconditionnel et ta présence dans ma vie .

A mes amies **Amel, Fatma**, merci pour votre présence, vos encouragements, vos sourires et vos mots qui m'ont portée tout au long de ce parcours, votre amitié a été un véritable soutien .

A tout ce que je connais sans exceptions .

A ceux qui m'ont offert, parfois sans le savoir, un mot, un regard, ou un silence qui m'ont redonné courage ...

A tout ceux qui, même un instant, ont cru en moi ...

AYA



Dédicace

Avant toute chose, je rends grâce à Dieu, source de toute force et de toute lumière, qui m'a guidée jusqu'au bout de ce chemin .

À mes parents bien-aimés, **Makhlouf Mohamed Salahet Harameza Souria**, piliers de ma vie, dont l'amour inconditionnel et les prières silencieuses ont été mes plus précieuses richesses .

À mes frères et sœurs, **Imane, Nesrine, Mohamed, Youssef**, compagnons de cœur et d'âme,

Et à ma petite nièce chérie **Assil**, rayon de soleil de nos jours .

À ma grand-mère adorée **Rachida**, que Dieu la garde en santé et en paix, et à ma cousine **Taïba**, dont la présence m'a tant réconfortée .

À ceux qui m'ont offert, parfois sans le savoir, un mot, un regard ou un silence qui m'ont redonné courage...

À tous ceux qui, même un instant, ont cru en moi...

Je vous dédie ce modeste travail, empreint de gratitude, d'amour et de mémoire

Noure Elhouda

Listesdesabréviations

Listedesabréviations

ANSES: Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

A .platensis:

Arthrospiraplatensis

CuSO₄: sulfatede cuivre

CO₂: Dioxydedecarbone

°C : Degrés Celsius

DO: Densité optique

UV: ultraviolet

OH⁻: Ionhydroxyde

KI: iodurede potassium

NaKC₄H₄O₆·4H₂O: tartratedouble desodiumet potassiumtétrahydraté

HCO₃⁻: Ionbicarbonate

S .platensis: *Spirulinaplatensis*

S .maxima: *Spirulinamaxima*

Lux: l'unitéde mesurede l'éclairementlumineux

BSA : Bovine Serum Albumin (Albumine de sérum bovin)

DPPH: Méthodedemesurede l'activitéantioxydante(radical 2,2-diphényl-1-picrylhydrazyle)

NaOH: Hydroxydedesodium .

Listesdesabréviations

V/V:volume/volume

p/v : poids/volume

µL : microlitre

nm:nanomètre

MS:Matièresèche

RPM : Tours par minute

GLA: l'acide γ-linolénique

SDA:l'acide stéaridonique

EPA : l'acide eicosapentaénoïque

DHA:l'acide docosahexaénoïque

AA : l'acide arachidonique

ASX:L'astaxanthine

Ca-SP : Le spirulane calcique

AND: acide désoxyribonucléique

Vitamine B1: Thiamine

B2:Riboflavine **Vitamine B6** :

Pyridoxine

Vitamine B12:Cyanocobalamine

Vitamine C : Acide ascorbique

Vitamine E : Tocophérol

PP: Acide nicotinique

Listesdesabréviations

AJR : apports journalistes recommandés

HSV-1 :virusde l'herpèssimplexde type 1

VIH:virusdel'immunodéficiencehumaine

HSV-2 :virusde l'herpèssimplexde type 2

CMV:cytomegalovirus(humanbetaherpesvirus5)

SSPE: panencéphalitesclérosantesubaigue

VSV:virusdelastomatitevésiculeuse

leTNF- α :Tumor Necrosis Factor α

DI₅₀:Concentrationentraînantl'inhibitionde50%descellules .

DE₅₀ :Concentrationminimalenécessairepourréduirel'infectionde50% .

PH: potentiel d'hydrogène

mg :milligramme

g:gramme

% : pourcentage

µg:microgramme

ES : extrait sec

EAG: équilibreacidegallique

EQ: équilibrequercitrine

CI50: concentrationinhibitricede50%

ml:millilitre

DPPH:2,2diphenyl-1-picrylhydraz

Listesdes tableaux

Listedesfigures

N°	Titre	Page
01	Observationmicroscopiqued'Arthrospiraplatensis .	7
02	Diversesmorphologies dela Spiruline : (A) spiralée,(B) ondulée,(C) droite	8
03	Lecycledeviedel'Arthrospiraplatensis	10
04	Diagrame illustrant les differentes flux impepliques dans la culture dela spiruline	12
05	Profil delacompositionchimiquedelaspiruline	18
06	SpirulineenpoudrecultivéedanslarégiondeBiskra	33
07	Évaporationsousvideàl'aiderotavapeur	36
08	Lesétapesd'extractionhydro-alcooliquedesextraitsbrutesàpartirdela poudre de spiruline par macération	37
09	Montagedel'extracteurdesoxhletutilisépourl'extractiondes lipides .	40
10	Lacourbed'étalonnagedessucrestotaux	50
11	Lacourbed'étalonnagedesprotéines	51
12	Lacourbed'étalonnagedespolyphénols	53
13	Lacourbed'étalonnagedesflavonoïdes	54
14	Lacourbed'étalonnagedutestDPHH	58
15	Zonesd'inhibition observéesautour desdisquesd'antibiotiquesutilisés comme contrôles positifs contre les souches bactériennes testés .	60

Listesdes tableaux

Listedestableaux		
N°	Titre	Page
01	Comparaison deteneur en protéines de la spiruline avec d'autres aliments	19
02	Acides aminés essentiels de la spiruline en grammes pour 100g de protéines	20
03	Présente les principaux acides gras de la spiruline	21
04	Teneurs en vitamine (mg/kg) de matière sèche de la SPIRULINE .	25
05	Teneur moyenne et principales fonctions des minéraux et des oligoéléments de la Spiruline .	26
06	Synthèse de l'activité antivirale de la spiruline contre différents virus	30
07	Liste du matériel non biologique utilisé lors de l'étude	34
08	Liste des souches bactériennes étudiées	46
09	Résultats du screening phytochimique de la spiruline <i>Arthrospira platensis</i>	55
11	Des boîtes de pétri montrant l'absence des zones d'inhibition autour des disques contenant l'extrait de spiruline <i>Arthrospira platensis</i> contre différentes souches bactériennes	61

Résumé

Résumé

Cette étude vise à évaluer certaines propriétés chimiques et biologiques de la microalgue *SpirulinaArthrospira platensis*, en mettant l'accent sur sa teneur en composés bioactifs (Métabolites secondaires) ainsi que sur son activité antioxydante et antibactérienne ont été réalisées sur des échantillons cultivés localement dans la région de Biskra . Les teneurs en protéines (11,9 %), sucres totaux (1,87 %) et lipides (6,2 %) ont été déterminées, mettant en évidence une composition nutritionnelle intéressante . L'analyse des composés phénoliques a révélé une teneur moyenne en polyphénols totaux de 220,18 mg EAG/g et une teneur en flavonoïdes totaux de 37,814 mg EQ/g, soulignant un potentiel antioxydant notable . L'activité antioxydante, évaluée par le test DPPH, a donné une valeur d'IC₅₀ de 2,87 mg/ml, indiquant une activité modérée . En revanche, les tests microbiologiques réalisés contre trois souches pathogènes (*Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* et *Pseudomonas aeruginosa*) n'ont montré aucune activité antibactérienne, suggérant une absence d'effet dans les conditions expérimentales utilisées . Ces résultats mettent en évidence l'intérêt nutritionnel de la spiruline, tout en soulignant la nécessité d'études complémentaires pour mieux cerner son potentiel biologique

Mots-clés: Spiruline, composés bioactifs, polyphénols, flavonoïdes, activité antioxydante, activité antibactérienne

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم بعض الخصائص الكيميائية والبيولوجية للطحلب الدقيق *Spirulina Arthrospira platensis*، مع التركيز بشكل خاص على غناه بالمركبات النشطة بيولوجيًا (المستقلبات الثانوية)، بالإضافة إلى أنشطته المضادة للأكسدة والمضادة للبكتيريا. وقد أجريت التحاليل على عينات مزروعة محليًا في منطقة بسكرة. تم تحديد نسب البروتينات (9.11 %)، والسكريات الكلية (1.87 %)، والدهون (2.06 %)، مما كشف عن تركيبة غذائية واعدة. أظهرت نتائج تحليل المركبات الفينولية وجود محتوى متوسط من البوليفينولات الكلية بلغ 220.18 ملغ EAG/غرام، ومن الفلافونويدات الكلية بلغ 37.814 ملغ EQ/غرام، مما يدل على قدرة مضادة للأكسدة مهمة. أما النشاط المضاد للأكسدة، الذي تم تقييمه باختبار DPPH، فقد أظهر قيمة IC_{50} بلغت 2.87 ملغ/مل، مما يشير إلى نشاط معتدل. وعلى العكس من ذلك، فإن الاختبارات الميكروبيولوجية ضد ثلاث سلالات ممرضة (*Staphylococcus aureus*، *Escherichia coli*، و *aeruginosa* *Pseudomonas*) لم تُظهر أي نشاط مضاد للبكتيريا، مما يشير إلى غياب التأثير في ظل الظروف التجريبية المعتمدة. تبرز هذه النتائج الأهمية الغذائية للسبيرولينا، مع التأكيد على ضرورة إجراء دراسات إضافية لفهم وتثمين إمكاناتها البيولوجية بشكل أفضل.

الكلمات المفتاحية: سبيرولينا، المركبات النشطة بيولوجيًا، البوليفينولات، الفلافونويدات، النشاط المضاد للأكسدة، النشاط المضاد للبكتيريا

Abstract

Abstract

This study aims to evaluate certain chemical and biological properties of the microalga *Spirulina Arthrospira platensis*, with a particular focus on its richness in bioactive compounds (secondary metabolites), as well as its antioxidant and antibacterial activities . The analyses were conducted on samples locally cultivated in the Biskra region . The contents of proteins (11 .9 %), total sugars (1 .87 %), and lipids (6 .2%) were determined, revealing a promising nutritional composition . The analysis of phenolic compounds showed an average content of total polyphenols of 220 .18 mg GAE/g and total flavonoids of 37 .814 mg QE/g, indicating a significant antioxidant potential . The antioxidant activity, assessed using the DPPH test, yielded an IC₅₀ value of 2 .87 mg/ml, indicating moderate activity . In contrast, microbiological tests performed against three pathogenic strains (*Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, and *Pseudomonas aeruginosa*) showed no antibacterial activity, suggesting a lack of effect under the experimental conditions applied . These results highlight the nutritional value of spirulina, while emphasizing the need for further studies to better assess and enhance its biological potential .

Keywords: Spirulina, bioactive compounds, polyphenols, flavonoids, antioxidant activity, antibacterial activity

Sommaire

Sommaire

Remercîments Dédicace

Listes desabréviations

Listesdes figures

Listes des tableau

Résumé

ملخص

Abstract

Sommaire

Introduction

Introduction1

Premièrepartie

Synthèse bibliographique

ChapitreI:Presentation D'arthrospiraPlatensis

I. présentation d'Arthrospira platensis.....5

I.1. Définitiondesmicroalgues.....5

I.3. Définitionde laspiruline6

I.4. Morphologie.....7

I.5. Taxonomie8

I.6. Ecologiedelaspiruline9

I.7. lareproductiondelaspiruline.....9

I.8. Laculturedelaspiruline..... 10

I.8.1. Milieuxdeculture 12

I.8.1.1 L'eau 12

I.8.1.2 Lesélémentsnutritifs 13

I.8.2. Conditiondeculture 13

I.8.2.1 Latempérature 13

I.8.2.2 Lalumière..... 14

I.8.2.3 LepH 14

I.9. Applicationsprincipalesd'ArthrospiraPlatensis 14

Sommaire

I.9.1 Enalimentationhumaine.....	14
I.9.2. Enmédecine.....	15
I.9.4. Enagroalimentaire	16
I.9.4 Autresapplication.....	16

ChapitreII:Labiochimieetlesactivitésd'arthrospiraplatensis

II. Biochimied'Arthrospiraplatensis.....	18
II.1. Compositionsbiochimiquesdelaspiruline.....	18
II.1.1 Lesprotéinesetles acides aminés	19
II.1.2 Leslipidesetlesacidesgras	20
II.1.3 Lesglucidesetlespolysaccharides	21
II.1.4 LesPigmentsbioactifs	22
II.1.4.1. Laphycocyanine	22
II.1.4.2. Chlorophylle	22
II.1.4.3. Caroténoïdes.....	23
II.1.5. Lesvitamines.....	23
II.1.6. Lesminérauxetlesoligoéléments	25
II.2. Lesactivitésbiologiquesdelaspiruline	28
II.2.1 L'activitéanti-oxydante	28
II.2.2 L'activitéantimicrobienne	29
II.2.3 L'activitéanti-cancéreuse.....	29
II.2.4 L'activitéantivirale	30
II .2 .5L'activitéanti-inflammatoire	31

DeuxièmePartieÉtudeexpérimentaleChapitre

I: Matériel et méthode

I. Matériel	33
I.1. MatérielBiologique	33
I.2. MatérielnonBiologique	33
II. Méthodes	35
II.1 Préparationdel'extraithydro-alcoolique.....	35
II.2. Dosagedessucrestotaux	38
II.3. Dosagedesprotéines(méthodedeBiuret)	38
II.4 Déterminationdelateneur enlipides	39

Sommaire

II.5 Détermination de la teneur en matière sèche et en humidité	40
II.6. Purification de l'extrait	41
II.6.1. Élimination des lipides (Défatage)	41
II.6.2. Élimination des protéines	41
II.7. Analyse quantitative des métabolites secondaires	41
II.7.1. Dosage des polyphénols	41
II.7.2. Dosage des flavonoïdes	42
II.8. Analyse phytochimique qualitative	42
II.8.1. Stérols et triterpènes	42
II.8.2. Les coumarines	42
II.8.3. Les mucilages	42
II.8.4. Terpénoïdes	43
II.8.5. Saponosides	43
II.8.6. Glucides	43
II.8.7. Composés phénoliques	43
II.8.8. Flavonoïdes	44
II.8.9. Lipide	44
II.9. Étude de l'activité biologique de la spiruline	44
II.9.1. Activité antioxydante	44

Chapitre II: Résultats et discussion

II. Résultats et discussion	49
II.1. Rendement d'extraction	49
II.2. Dosage des sucres totaux	49
II.3. Dosage des protéines	50
II.4. Teneur en lipide	51
II.5. Teneur en matière sèche et teneur d'humidité	52
II.6. Résultats de l'analyse quantitative des métabolites secondaires	52
II.6.1. Dosage des polyphénols totaux	52
II.6.2. Dosage des flavonoïdes	53
II.6.3. Analyse phytochimique qualitative	54
II.7. Les activités biologiques	58
II.7.1. L'activité antioxydante	58

Sommaire

II.7.2. L'activité anti-bactérienne.....	59
Conclusion.....	64
Les références bibliographiques	66
ANNEXE.....	70



Introduction

Introduction

Introduction

Les microalgues suscitent un vif intérêt en raison de leurs multiples applications et de leurs avantages potentiels . Ces organismes microscopiques offrent des perspectives prometteuses dans divers domaines, tels que la production d'énergie, la nutrition humaine et animale, ainsi que le traitement des eaux usées (Sialve & Steyer, 2013) . Elles constituent également une source précieuse de métabolites et de composés biochimiques encore largement inexplorés, ouvrant ainsi la voie à des innovations biotechnologiques (Bougaran & Saint-Jean, 2014) .

Les macro-algues jouent un rôle fondamental dans les écosystèmes côtiers en fournissant à la fois nourriture et habitat aux communautés benthiques (Tamigneaux et Johnson, 2016) . Elles se répartissent en trois grandes catégories – algues brunes, rouges et vertes – selon la nature de leurs pigments (Mabeau *et al* ., 1990 ; Tasende et Peteiro, 2015) .

Parmi les micro-algues, le procaryote microscopique et filamenteux *Spiruline* (*Arthrospira platensis*), a fait l'objet de nombreuses recherches, principalement en raison de ses utilisations variées comme aliment, fourrage, complément alimentaire et aliment fonctionnel . Son utilisation historique comme aliment remonte à des siècles et elle est commercialisée comme produit alimentaire depuis 30 ans .

Bien qu'il existe de nombreuses études sur la production de masse de la spiruline en extérieur, celles-ci se concentrent principalement sur de petits étangs expérimentaux . Par conséquent, il y a peu d'informations provenant d'installations commerciales à grande échelle qui produisent de la spiruline dans de grands étangs extérieurs . La production à petite échelle dans des étangs expérimentaux est limitée dans son application, car elle ne prend pas en compte les effets continus de la récolte et du recyclage des nutriments, qui influencent à la fois le rendement et la qualité du produit (Belay, A, . 2007) .

La spiruline est cultivée de manière intensive dans les pays développés, où des fermes industrielles modernes s'étendant sur plusieurs hectares exploitent cette cyanobactérie pour produire et commercialiser divers compléments alimentaires vantant ses bienfaits . Grâce à ses nombreuses qualités, cette algue est considérée comme un aliment fonctionnel qui suscite un intérêt croissant dans les secteurs agro-alimentaire et cosmétique . Toutefois, bien qu'elle ne soit pas brevetable, il est peu probable qu'elle attire l'attention des laboratoires pharmaceutiques pour

Introduction

la création de médicaments . Néanmoins, ces derniers pourraient analyser les molécules actives de la spiruline pour développer des substances thérapeutiques ciblées . L'ère de la nutrition-santé est encore en pleine émergence, mais l'intérêt pour la spiruline, ainsi que pour les microalgues en général, devrait rapidement augmenter dans les années à venir (**sguera,2008**) .

En Algérie, le premier mini-colloque sur la spiruline a eu lieu à Tamanrasset du 18 au 25 avril 2004 . Des chercheurs et scientifiques spécialisés dans la culture et l'utilisation de la spiruline, invités par M . Abdelkader Hiri, sont venus de France pour partager leurs connaissances . La lumière solaire est la principale « matière première » pour la culture de la spiruline, tandis que le natron, essentiel pour la préparation du milieu de culture, est abondant dans les régions au climat désertique, comme celle de Tamanrasset . Ainsi, cette région bénéficie d'un environnement propice à la culture de la spiruline (**Derdouri et al, . 2022**) .

Dans ce contexte, nous nous interrogeons sur les principaux composants bioactifs de la *Spiruline (Arthrospira platensis)* et leur influence sur ses propriétés nutritionnelles et thérapeutiques . Cette étude a pour objectif d'analyser les composants bioactifs d'un microalgues cas de *spirulina (arthrospiraplatensis)* en mettant l'accent sur ses propriétés nutritionnelles et biologiques . L'objectif principal est d'analyser la composition biochimique de la spiruline et les propriétés biologiques .

L'étude se divise en deux parties principales . La première est une synthèse bibliographique, composée de trois chapitres :

- Chapitre I: Présentation de *Arthrospira platensis*
- Chapitre II: Biochimie et les activités d'*Arthrospira platensis*
 - II.1. Composition biochimique générale de la spiruline (*Arthrospira platensis*)
 - II.2. Activités biologiques de la spiruline

La deuxième partie est une étude expérimentale, qui comprend deux chapitres:

- Le premier chapitre est consacré aux matériels et méthodes
- Le second chapitre présente les résultats et discussions .

Enfin, cette étude se conclut par une conclusion générale

.



Premièrepartie

Synthèsébibliographique



Chapitre I

Présentation D' *Arthrospira Platensis*

I. Présentation d'Arthrospira platensis**I.1. Définition des microalgues**

Les microalgues sont des organismes unicellulaires photosynthétiques variés, jouant un rôle essentiel dans les écosystèmes aquatiques (Caroppo & Pagliara, 2022). Ces microorganismes, comprenant à la fois des eucaryotes et des cyanobactéries procaryotes, possèdent une importance écologique majeure ainsi qu'un fort potentiel en biotechnologie (Thoré et al., 2023). De plus, les microalgues sont une source encore peu exploitée de métabolites et de composés bioactifs, ouvrant la voie à des innovations biotechnologiques prometteuses (Bougaran & Saint-Jean, 2014).

Les microalgues occupent une grande variété de niches écologiques. Bien qu'elles soient principalement présentes dans les environnements aquatiques, elles ont également colonisé les sols sains ainsi qu'une large gamme de surfaces, telles que les rochers, les arbres et même les édifices architecturaux (Macedo et al., 2009). Témoinnant de leur capacité d'adaptation, certaines espèces prospèrent dans les eaux issues de la fonte des glaces ou de la neige, tandis que d'autres se développent dans des environnements arides à semi-arides, comme les déserts.

Les cyanobactéries du genre *Arthrospira* (communément appelées Spiruline) sont souvent regroupées avec les micro-algues et désignées sous le terme d'« algues bleues ». Bien qu'elles possèdent des caractéristiques typiques des procaryotes, telles que l'absence de noyau et une paroi cellulaire de type Gram négatif, elles présentent également des traits propres aux eucaryotes, notamment la présence de pigments et la capacité de réaliser la photosynthèse.

La classification taxonomique des cyanobactéries *Arthrospira* est régulièrement révisée ; elles sont actuellement rattachées au règne des Eubactéries et à la classe des Cyanophycées (ANSES 2017). En raison de leur richesse en molécules bioactives et de leurs effets bénéfiques sur la santé, ces cyanobactéries sont souvent associées aux micro-algues, justifiant ainsi leur inclusion dans ce chapitre dédié à ces organismes.

I.2. Historique de la Spiruline

Les cyanobactéries, également appelées cyanobiontes ou cyanophycées, forment une famille d'algues bleu-vert à laquelle appartient la spiruline. Cette dernière est connue sous différentes appellations scientifiques, notamment *Arthrospira sp.*, *Spirulina sp.*, *Spirulina platensis* ou *Arthrospira platensis*. Il s'agit d'une cyanobactérie filamenteuse, utilisée depuis plusieurs siècles par certaines populations d'Afrique et du Mexique (Pentecost, 1991).

Les archives historiques mexicaines indiquent que la spiruline était déjà consommée à l'époque des Aztèques, bien avant l'arrivée des Espagnols, sous le nom de Tecuitlatl (**Farraret Techuitlatl, 1996**). Bien que décrite pour la première fois par Wittrock et Nordstedt en 1844 (**Wittrock et Nordstedt, 1999**). Sa véritable découverte est attribuée au botaniste français Dangeard en 1940, alors qu'il l'identifiait au Tchad. La tribu des Kanembous continue encore aujourd'hui à la consommer sous le nom de Dihé. Avec le développement des cultures de micro-algues à grande échelle à partir de la fin des années 1950, la spiruline a connu un intérêt croissant pour l'alimentation humaine (**Fox, R-D, 1999**).

La première production industrielle a été initiée en 1976 par l'entreprise Sosa Texcoco au Mexique. Par la suite, plusieurs sociétés se sont développées dans le domaine, notamment Siam Algae Company à Bangkok en 1979 et Earthrise Farm aux États-Unis en 1983, qui est aujourd'hui l'un des plus grands producteurs mondiaux. D'autres entreprises comme Cyanotech Corporation à Hawaï ont également contribué à son expansion. En France, le Conseil Supérieur d'Hygiène Publique a donné, en 1984, un avis favorable à la consommation humaine des algues spirulines (**Sguera, 2008**).

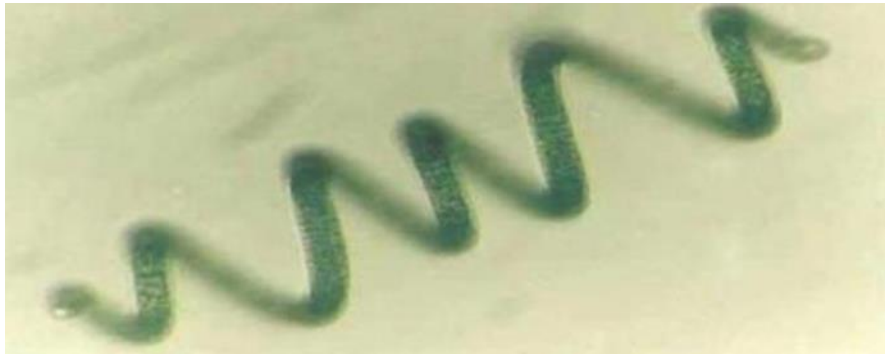
D'après Fox (1999), on estime à une trentaine le nombre d'exploitations industrielles dédiées à la culture de la spiruline à travers le monde (**Fox, RD, 1999**). Depuis, les recherches scientifiques ont largement progressé, mettant en évidence de nombreuses applications de la spiruline dans les domaines de la diététique, de la pharmacie, de l'environnement et de la bioénergie (**Hayachi et al., 1996 ; Vonshak, 2002**).

I.3. Définition de la spiruline

La spiruline (*Arthrospira platensis*) est une microalgue bleu-vert à haute valeur nutritionnelle et thérapeutique. Elle est riche en protéines, vitamines, minéraux et acides gras essentiels (**R. Br., 2020**). Considérée comme sûre pour la consommation humaine, elle possède des propriétés antioxydantes, antimicrobiennes et anticancéreuses (**Mugaonkar Bajirao, 2022**). La spiruline est facilement digestible grâce à l'absence de parois cellulaires, et elle est connue pour stimuler l'énergie et réduire le risque de divers cancers et infections (**A. Sharma et al., 2019**). Par ailleurs, elle montre un potentiel prometteur en tant que bio-fertilisant dans l'agriculture, en améliorant la fertilité des sols et en favorisant la croissance des plantes. Des

recherches ont révélé sa capacité à augmenter la teneur en chlorophylle et en caroténoïdes des plantes, ainsi qu'à améliorer les macronutriments et les propriétés physico-chimiques des sols (T. Indhumathi & M. Ramya, 2020). Ces différentes applications mettent en évidence le potentiel de la spiruline en nutrition, en médecine et pour une agriculture durable.

Figure 1: Observation microscopique d'*Arthrospiraplatensis* (Vicente, 2008).



I.4. Morphologie

La spiruline, une cyanobactérie aux filaments hélicoïdaux, peut passer d'une forme spirale à une forme linéaire sous certaines conditions. Fait intéressant, ces filaments linéaires peuvent retrouver leur structure hélicoïdale initiale, ce qui s'accompagne de modifications ultra structurales, physiologiques et biochimiques (**Wang & Zhao, 2005**). La forme hélicoïdale des filaments (ou trichomes) est une caractéristique propre au genre et se maintient uniquement en milieu liquide ou en culture. La présence de vacuoles remplies de gaz dans les cellules, associée à la structure hélicoïdale des filaments, favorise la formation de tapis flottants. Les trichomes mesurent entre 50 et 500 μm de long pour une largeur de 3 à 4 μm (**Habib et al., 2008**).

Plus précisément, la spiruline est constituée de cellules transparentes empilées bout à bout formant ainsi un filament ou trichome. L'enroulement du trichome sur lui-même s'effectue suivant le sens des aiguilles d'un montre lorsqu'on regarde au-dessus de la spirale. Les facteurs environnementaux telles les températures auraient cependant une influence sur l'orientation de l'hélice, (**Muhling et al., 2003**). Cette morphologie typique lui permet de se déplacer dans l'eau en adoptant le mouvement d'une vis.

Le système pigmentaire de la spiruline est constitué de chlorophylle a ; de pigments hydrosolubles, les phycobilles rouge (phycoérythrine) et bleu (phycocyanine); de caroténoïdes (β -carotène, crypto xanthine) (**Loïc Charpy et al., 2008**).

On observe différentes morphologies : "spirales", "ondulées" et "droites" (**figure 02**) (**Tsarahevitra, 2005**) . Ces particularités morphologiques sont directement liées aux conditions écologiques de leur habitat (**Charpy et al ., 2008**) .

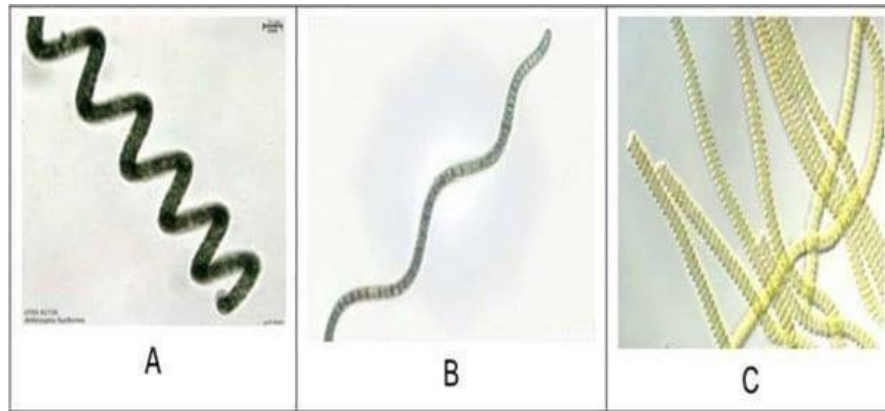


Figure02:Diverses morphologies de la Spiruline:(A)spiralee,(B)ondulee,(C)droite (**Charpy et al .,2008**) .

I.5. Taxonomie:

La classification systématique de la spiruline a fait l'objet d'études par plusieurs chercheurs .Initialementconsidéreecommeunealgue,elleafinalementétéreconnuecommeune cyanobactérie, une désignation adoptée et acceptée par la suite pour figurer dans le Bergey's Manual of Determinative Bacteriology (**Goulambasse, 2018**) .

Les deux espèces les plus connues sont *Spirulina platensis* (*S . platensis*), originaire d'Afrique, et *Spirulina maxima* (*S . maxima*), originaire d'Amérique centrale (**Sguera, 2008**) .

Onlaclasseelon**RipleyFox(1999)**dans:

Règne	Monera
Sous règne	Prokaryota Phylum Cyanobacteria
Classe	Cyanophyceae
Ordre	Nostocales
Famille	Oscillatoriceae
Genre	Arthrospira

Espèce	<i>Arthrospiraplatensis</i>
--------	-----------------------------

I.6. Ecologie de la spiruline

La spiruline est une cyanobactérie qui se développe par photosynthèse, un processus lui permettant de convertir les nutriments minéraux présents dans son environnement en matière organique (protéines, fibres, etc.), en utilisant l'eau, le dioxyde de carbone et la lumière (photons) (Galaret, A. (n.d.)). La température joue un rôle clé dans son développement, avec une plage optimale située entre 25 et 35 °C (Fagiri *et al.*, 2013 ; Bangun *et al.*, 2015 ; Karemore *et al.*, 2020). Le pH influence également sa croissance, avec de meilleurs résultats observés dans une plage de 7 à 8. L'intensité lumineuse est un autre facteur déterminant, les conditions idéales se situant entre 1 500 et 2 500 lux (Fagiri *et al.*, 2013).

Les variations de température affectent les paramètres photosynthétiques et la teneur en pigments, une exposition prolongée au-delà de 35 °C entraînant une diminution des performances (Karemore *et al.*, 2020). Une analyse protéomique a identifié 122 protéines dont l'expression varie en réponse aux fluctuations thermiques. Ces protéines sont impliquées dans des processus tels que la modification post-traductionnelle, le métabolisme énergétique, la traduction et le transport des glucides (Huili *et al.*, 2013), contribuant probablement à la résistance thermique de *A. platensis*.

La prise en compte de ces facteurs est essentielle pour optimiser la culture de *A. platensis*, que ce soit en laboratoire ou à l'échelle industrielle.

Elle se trouve naturellement dans les lacs alcalins d'Afrique, notamment le lac Tchad (Ayi Mojisola, 2020), et est traditionnellement consommée en Afrique, en Amérique du Sud et en Asie. Bien que sa consommation en Europe soit encore en développement, le nombre de producteurs augmente, particulièrement en France (Abert Vian, 2021).

I.7. La reproduction de la spiruline

La spiruline se reproduit de manière végétative, c'est-à-dire de façon asexuée, principalement par scission simple ou multiple, par bourgeonnement ou par fragmentation aléatoire. Chez certaines espèces, des cellules spécialisées appelées akinètes peuvent survivre à la dessiccation et "germer" lorsque les conditions deviennent à nouveau favorables. Le temps de doublement des populations varie de quelques heures à plusieurs jours en fonction des espèces.

et des conditions environnementales. Son processus de reproduction et son cycle biologique incluent la photosynthèse et la croissance dans différents systèmes de culture (Vonshak, 1997).

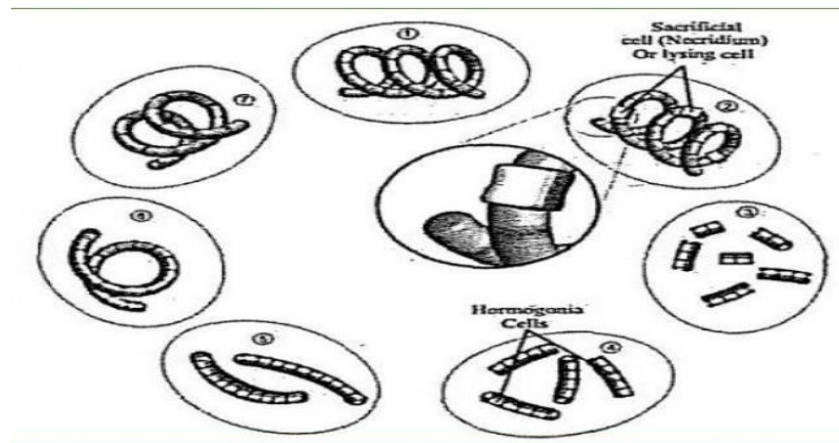


Figure03:Le cycle de vie de l'*Arthrospira platensis* (Sánchez et al .,2003) .

Arthrospira platensis(AP) est une cyanobactérie de grande valeur économique et compte parmi les microalgues les plus cultivées industriellement. Comprendre sa croissance est essentiel pour appréhender sa physiologie et optimiser son rendement. La biomasse d'AP se développe selon deux mécanismes : la fragmentation des trichomes favorisant leur propagation, et l'allongement des trichomes par fission binaire jusqu'à leur maturité. Ces différentes phases de croissance sont mises en évidence grâce à l'observation de cellules vivantes sous lumière et à la microscopie à balayage laser. (Jung, F *et al.*, 2021).

I.8. La culture de la spiruline

Arthrospira (*Spirulina platensis*) est une micro-algue procaryote largement cultivée à travers le monde (**Benahmed Djilali, 2012**) . Sa culture peut se faire en milieu naturel, semi-naturel (**Adel et al ., 2014**) ou dans des environnements synthétiques contrôlés, adaptés à différentes échelles de production (**Dansou, 2002; Jourdron, 2006**) .

Pour assurer une bonne croissance en milieu synthétique, il est essentiel de réunir plusieurs conditions (**Lemkadem, 2015**) :

Un bassin artificiel contenant de l'eau enrichie en sels minéraux;

Unesourcededioxydedecarbone(CO_2)sousformed'ionscarbonate(CO_3^{2-})ou bicarbonate (HCO_3^-) pour favoriser la photosynthèse ;

Unapport enazotepourlacroissancecellulaire; Un

inoculum de spiruline (souche de départ) ;

Uneexpositionà la lumière,nécessaireà laphotosynthèse;

Unsystemed'agitation, telqu'uneroueàaubes, pouroptimiser l'absorptionde la lumière et des nutriments ;

Unetempératurecompriseentre25et40°C; Un pH

basique, variant entre 8,5 et 11 .

Lorsque ces paramètres sont respectés, la culture de la spiruline se développe de manière optimale .

L'investissement nécessaire pour établir une petite ferme de production d'une tonne de spiruline est estimé à 323 000 euros . En Algérie, la production de spiruline en est encore à un stade artisanal et expérimental . Hiri Abdelkader, le seul Algérien maîtrisant parfaitement le processus de culture de cette algue, a réussi à la transplanter de son habitat naturel, El Guelta, vers un bassin artificiel . Situé dans la région de Tamanrasset, ce bassin couvre une superficie légèrement supérieure à 20 m² et permet une production annuelle de 20 kg de spiruline sèche . Quatre mois après l'ensemencement, la récolte peut déjà commencer (M'hamed, H , 2010) .

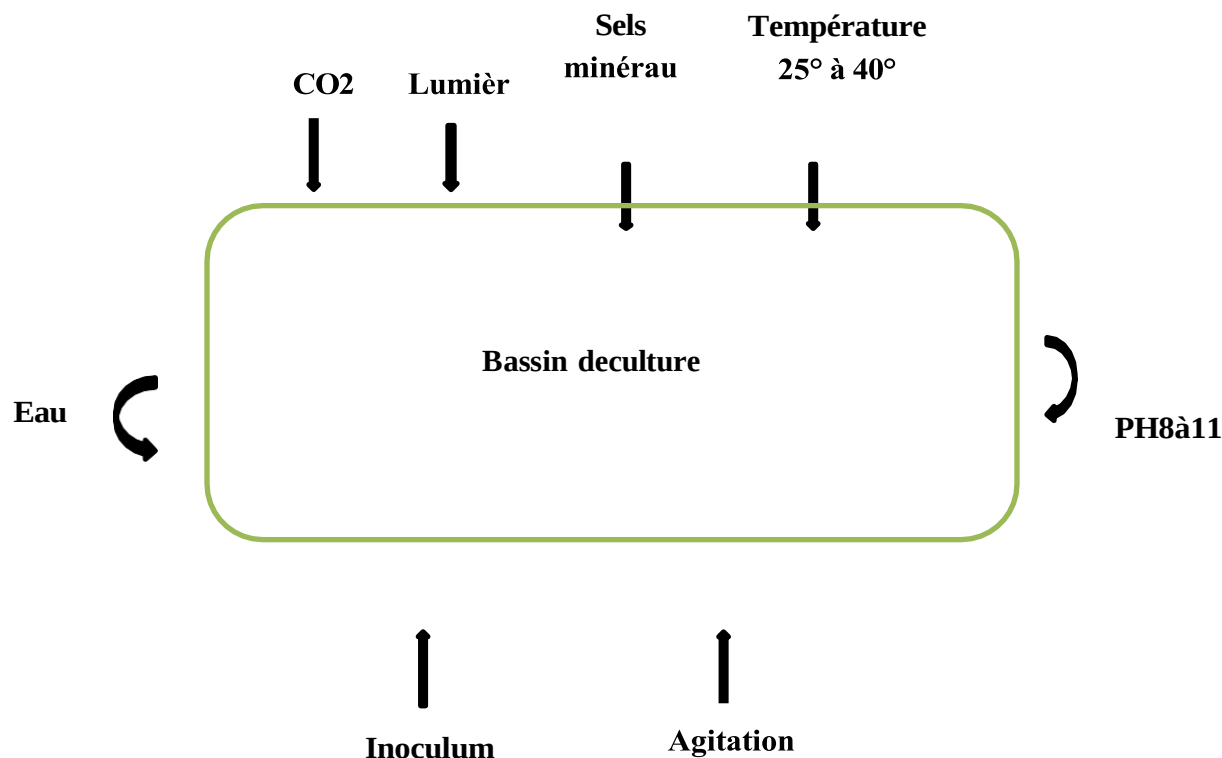


Figure 4: Diagramme illustrant les différents flux impliqués dans la culture de la spiruline (LEMKADEM, 2015)

I.8.1. Milieux de culture

Le milieu de culture utilisé pour la croissance de la spiruline repose principalement sur la formulation de Zarrouk (1966). Il se compose d'eau, de carbonate ou bicarbonate de sodium, d'une source d'azote, de phosphore, de fer et d'autres oligo-éléments essentiels au développement de la micro algue (Belay, 2007).

I.8.1.1 L'eau

L'un des facteurs les plus déterminants pour la culture de Spiruline est la qualité de l'eau utilisée, notamment sa composition chimique. Bien que cette microalgue puisse tolérer une large gamme de salinité, il est généralement préférable d'opter pour des concentrations minimales afin d'optimiser la productivité et de réduire les coûts. Une salinité totale de 13 g/l est souvent recommandée (Jordan, 1999), tandis que la zone optimale de croissance se situe entre 22 et 62 g/l (Iltis, 1968).

Selon **Vonshak (1997)**, une exposition à des niveaux élevés de NaCl entraîne un arrêt immédiat de la croissance et une diminution de la biomasse durant au moins 24 heures . Ce phénomène est dû à une baisse de l'activité photosynthétique sous l'effet du stress salin . La spiruline ajuste alors ses besoins en énergie lumineuse, nécessitant moins de lumière pour atteindre la saturation photosynthétique .

I.8.1.2 Les éléments nutritifs

L'eau peut naturellement contenir certains nutriments essentiels à la spiruline, réduisant ainsi la quantité d'intrants nécessaires . Toutefois, pour assurer un développement optimal, le milieu de culture doit contenir les éléments suivants (**Jordan, 1999**) :

- Bicarbonate de sodium (NaHCO_3): il permet de maintenir une alcalinité stable et peut être remplacé par des sources naturelles comme le natron ou l'eau de cendre .

- Phosphore (P) : essentiel à la photosynthèse, il est apporté sous forme d'orthophosphate soluble .

- Azote (N) : constituant fondamental des acides aminés, il provient atmosphérique et de sources azotées comme l'urée .

- Carbone (C): indispensable à la croissance de la spiruline, il est principalement fourni sous forme de gaz carbonique (CO_2) et peut également provenir du sucre .

- Métaux et oligo-éléments : certains métaux jouent un rôle essentiel dans le métabolisme de la spiruline, notamment le fer, qui intervient dans la photosynthèse, le bore, nécessaire à la croissance cellulaire, et le magnésium, un cofacteur enzymatique crucial .

L'apport équilibré de ces éléments garantit un environnement de culture optimal et favorise une production de biomasse de qualité .

I.8.2. Condition de culture

La culture des microalgues dépend principalement de trois facteurs : la température, la lumière et le pH . Ces organismes sont très sensibles aux variations brusques de ces paramètres . D'autres éléments, bien que secondaires, peuvent également influencer leur développement, comme l'agitation du milieu .

I.8.2.1 La température

La spiruline se développe de manière optimale à une température comprise entre 35 et 38 °C . Cependant, une croissance minimale est encore possible à partir de 15 °C (**Belay, 2002**) . Au-

au-delà de 40 °C, les conditions deviennent défavorables, et une exposition prolongée à 43 °C entraîne sa mort (Fox, 1999) .

I.8.2.2 La lumière

La lumière est la principale source d'énergie des microalgues, indispensables à la photosynthèse . La durée et l'intensité de l'ensoleillement influencent directement leur croissance . La spiruline possède un seuil optimal d'irradiance au-delà duquel un excès de lumière devient nuisible . Une exposition trop intense peut entraîner un phénomène de photo inhibition, conduisant à la destruction des cellules (Jordan, 1999) .

I.8.2.3 Le pH

L'eau utilisée pour la culture de la spiruline doit être basique, avec un pH compris entre 9 et 11 (performe, 2022) . Naturellement, cet organisme tend à alcaliniser son environnement . En effet, lorsqu'elle absorbe le CO₂ dissous dans l'eau, celui-ci libère des ions carbonates (CO₃²⁻) . Ces derniers, en s'hydrolysant, génèrent des ions hydroxydes (OH⁻), augmentant ainsi le pH du milieu (Danesi et al ., 2004)

I.9. Applications principales d'Arthrospira Platensis

La spiruline, possède de multiples applications dans divers secteurs . Grâce à sa richesse nutritionnelle, notamment en protéines, acides aminés essentiels, vitamines et minéraux, Elle peut offrir plusieurs performances . (W . Shao et al ., 2019; D . Kt, 2024) .

I.9.1 En alimentation humaine

En raison de son profil nutritionnel exceptionnel, la spiruline offre de multiples avantages:

- Lutte contre la malnutrition : Utilisée par des organisations humanitaires et des professionnels de la santé, la spiruline sous forme de poudre est mélangée à des céréales ou à de l'eau pour venir en aide aux enfants souffrant de malnutrition sévère . Elle s'avère plus efficace que les médicaments pour combler les carences et traiter les maladies liées à la famine, telles que le marasme ou le kwashiorkor (Fox, 1999) .
- Pour les sportifs : Sa consommation facilite l'effort physique et améliore la récupération après l'exercice .
- pour les femmes enceintes: Reconnue pour sa richesse en vitamines B9 et B12 ainsi qu'en fer, la spiruline constitue un excellent complément pour les femmes enceintes, leur

apportant les nutriments essentiels dont elles ont besoin . Grâce à la phycocyanine, qui favorise l'oxygénation musculaire et réduit les crampes utérines, elle contribue à une meilleure préparation à l'accouchement . De plus, elle aide à atténuer la fatigue liée à l'allaitement et favorise une récupération optimale après l'accouchement (**Lahoucin, 2019**) .

- Pour les enfants et adolescents: La spiruline est particulièrement adaptée aux enfants, aux adolescents et aux bébés en âge de consommer des protéines . Son apport en nutriments essentiels de haute qualité, combiné à sa grande assimilabilité, en fait un aliment idéal pour les organismes en croissance . Une consommation quotidienne de trois à cinq grammes suffit pour prévenir les carences et éliminer les toxines liées à une alimentation peu saine . Elle contribue également à améliorer la qualité de la peau (**Vidalo, 2015**) .

- Endiététique: Utilisée comme complément protéique, la spiruline est bénéfique pour la santé . Elle agit comme un coupe-faim naturel, réduisant l'appétit tout en optimisant l'apport énergétique (**Tremblin et Moreau, 2017**) .

I.9.2. En médecine

Des essais cliniques ont démontré que la spiruline peut être utilisée comme traitement complémentaire pour diverses maladies (**Ghaeni et Roomiani, 2016**), en raison de ses effets bénéfiques dans plusieurs domaines thérapeutiques majeurs :

- Action anticancéreuse
- Effet hypo-protéïnémique
- Protection contre l'obésité et le diabète (**Demisuet Benti, 2018**) .

I.9.3. En cosmétique

Certains laboratoires de cosmétiques intègrent la spiruline dans leurs produits tels que crèmes, shampoings et sérums, en raison de la richesse en actifs naturels qu'elle contient, tels que les acides aminés, oligoéléments, antioxydants, minéraux, vitamines, acides nucléiques (composants de l'ADN), protéines et acides gras essentiels. Grâce à ses propriétés antioxydantes, qui empêchent la formation de radicaux libres, la spiruline améliore la souplesse et l'élasticité de la peau, retardant ainsi son vieillissement, tout en apportant brillance et résistance aux ongles et aux cheveux grâce aux nutriments et oligoéléments qu'elle concentre (**Banks, 2007**) . Considérée comme un aliment "beauté" exceptionnel, la spiruline est aujourd'hui utilisée dans des soins anti-âges à tendance marine, dans la préparation de produits de soins en spa et thalassothérapie (masques pour le visage, enveloppements corporels), pour renforcer et réparer les cheveux et les

ongles, encataplasmes et enveloppements marins, ainsi que pour revitaliser le corps ou réaliser des masques minéralisant pour le visage (Casal, 2019) .

I.9.4. En agroalimentaire

La spiruline est employée comme colorant naturel, en particulier la phycocyanine, un pigment bleu rare, dans divers produits tels que les chewing-gums, les sorbets, les sucreries, les produits laitiers et les boissons non alcoolisées . Elle est également utilisée dans des produits à base d'algues mélangées à du sel, des tagliatelles, etc . En Suisse et au Japon, du pain à la spiruline est disponible depuis longtemps (Boudaoud, 2016) .

I.9.4 Autres applications

Arthrospira platensis peut également être utilisée comme agent de phytoremédiation pour assainir les eaux contaminées par des produits chimiques . Les cellules de l'*Arthrospira* renferment de grandes quantités de composés tels que des enzymes, des peptides, des acides aminés, et d'autres substances bioactives, qui ont la capacité de se lier aux métaux lourds sous forme d'ions, ainsi qu'aux composés organiques toxiques . Cette capacité de la spiruline à capter et éliminer les polluants fait d'elle un outil prometteur pour le nettoyage des milieux aquatiques pollués (Tabagari *et al.* , 2019) .



ChapitreII

Labiochimieetlesactivités
d'Arthrospiraplatensis

II. Biochimie d'*Arthrospira platensis*

II.1. Compositions biochimiques de la spiruline

La spiruline est considérée comme un superaliment en raison de sa richesse exceptionnelle en éléments nutritifs. Elle possède une valeur nutritionnelle élevée, aussi bien sous sa forme brute (biomasse) que sous sa forme commercialisée. De plus, sa production ne requiert généralement ni transformation ni traitement particulier (Casal A., 2012).

Arthrospira platensis, communément appelée spiruline, est une cyanobactérie à la composition biochimique diversifiée, caractérisée par une teneur élevée en protéines (55 à 70 %), en glucides (15 à 25 %) et en acides gras essentiels (18 %). Elle contient également des pigments bioactifs, notamment les caroténoïdes, la chlorophylle a et la phycocyanine, qui lui confèrent un intérêt particulier dans les industries alimentaire et cosmétique (Ali & Saleh, 2012). Cependant, la composition biochimique de la spiruline varie en fonction des conditions environnementales, notamment en cas de carence en phosphore, où l'on observe une augmentation de la teneur en glucides jusqu'à 65 %, une hausse des lipides à 7,5 %, tandis que la proportion de protéines diminue à 25 % (Markou, 2012). Ces variations biochimiques influencent ses propriétés nutritionnelles, renforçant son potentiel en tant que complément alimentaire et ingrédient fonctionnel dans diverses applications agroalimentaires et pharmaceutiques.

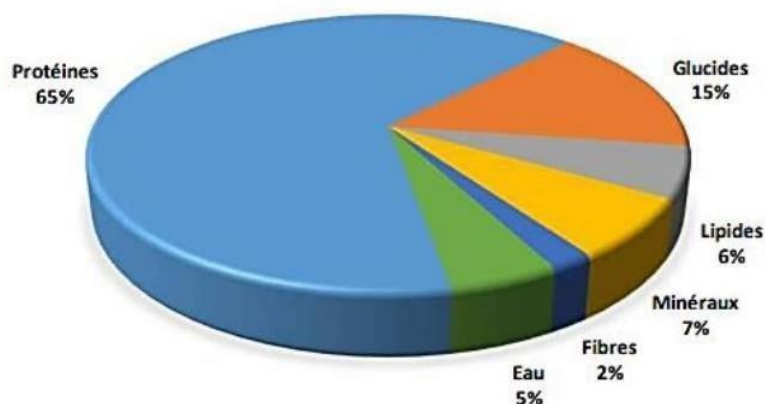


Figure 5: Profil de la composition chimique de la spiruline (Lecointre, 2017)

II.1.1 Les protéines et les acides aminés

Arthrospiraplatensis constitue une source alternative de protéines et peut être utilisée comme complément ou additif alimentaire (Avila-Leon et al., 2012).

La spiruline contient entre 50 et 70

% de protéines sur son poids sec, des niveaux remarquablement élevés, même parmi les micro-organismes (Hajati & Zaghari, 2019). Cependant, cette composition peut varier en fonction des conditions de culture, de la période de récolte, de l'origine géographique et de divers autres facteurs (Niangoren, 2017).

Tableau 01: Comparaison de teneur en protéines de la spiruline avec d'autres aliments (Magermans et al., 2019 modifier).

Aliment	Teneur en protéines
Viande	30%
Poisson	25%
Soja	35%
Poudre de lait	35%
Céréales	14%
La spiruline	50-70%

La spiruline contient la majorité des acides aminés, y compris l'ensemble des acides aminés essentiels, qui représentent environ 60 % du poids total des protéines. Parmi ces acides aminés essentiels, les acides aminés soufrés, tels que la méthionine et la cystéine, sont les moins abondants (cette dernière étant parfois absente selon certaines publications) (Girardin, 2005).

Le profil en acides aminés de la spiruline confère à ses protéines une valeur biologique élevée, qui pourrait être optimisée par l'ajustement des conditions de culture. Par exemple, des études ont montré que la teneur en protéines varie de 10 à 15 % en fonction du moment de la récolte par rapport à la photopériode, avec des concentrations maximales observées au début de la phase lumineuse (AFAA, 1982).

Tableau 02: Acides aminés essentiels de la spiruline en grammes pour 100 g de protéines
(Clément, 1975)

Acides aminés essentiels	Teneur en grammes pour 100 g de protéines
Leucine	8,91
Lysine	4,58
Méthionine	2,65
Phénylalanine	4,53
Thrénine	5,23
Tryptophane	1,60
Valine	6,74
Isoleucine	6,24

II.1.2 Les lipides et les acides gras

Les lipides de la spiruline, bien que moins abondants que les protéines, contribuent de manière significative à sa composition chimique globale (**Bortolini DG, 2022**)

Les lipides de la spiruline, représentant environ 5 à 6 % de son poids total (**Salle et al., 1999**), offrent un équilibre idéal entre les oméga-3 et oméga-6, favorisant ainsi la santé cardiovasculaire . L'apport direct en acides α et γ -linoléiques, qui constituent 40 % des acides gras essentiels, en fait un atout nutritionnel majeur (**Michka, 2005**) .

Cette fraction lipidique présente un bon équilibre entre les acides gras saturés et les acides gras polyinsaturés (**Charpy, 2004**) . Peuvent être divisés en deux fractions : une fraction saponifiable représentant 83 %, et une fraction insaponifiable constituant 17 % . Cette dernière contient principalement de la paraffine, des pigments, des alcools terpéniques et des stérols (**Rose et Dominy, 1990**) .

La spiruline est une source d'acides gras essentiels, notamment l'acide γ -linoléique (GLA), l'acide stéarique (SDA), l'acide eicosapentaénoïque (EPA), l'acide docosahexaénoïque (DHA) et l'acide arachidique (AA) (**Hbib et al., 2008**) .

Chapitre II labiochimie et les activités de *Arthrospiraplatensis*

➤ Profil typique des acides gras de la spiruline (*Arthrospiraplatensis*):

Tableau 03: présente les principaux acides gras de la spiruline selon Falquet et Hurni (2006) .

Acide gras	% des acides gras totaux
Palmitique (16:0)	25-60%
Palmitoléique (16:1)	0,5-10%
Stéarique (18:0)	0,5-2%
Oléique (18:1) oméga 6	5-16%
Linoléique (18:2) oméga-6	10-30%
γ -Linolénique (18:3) oméga-6	8-40%
α -Linolénique (18:3) oméga-3	Absent

II.1.3 Les glucides et les polysaccharides

Les glucides représentent environ 15 à 20 % du poids sec de la spiruline (Chaiklahan *et al*., 2022) . L'essentiel des glucides assimilables de la spiruline est composé de polymères, notamment des glucosanes aminés (1,9 % du poids sec) et des rhamnosanes aminés (9,7 %), ainsi que de glycogène (0,5 %) (Ciferri, 1983 ; Falquet et Hurni, 2006) .

Ils se présentent principalement sous forme de polysaccharides, qui jouent un rôle à la fois structurel et énergétique au sein de cette cyanobactérie (Sousa e Silva *et al* ., 2018) .

Parmi ces polysaccharides, on trouve des polysaccharides sulfatés, reconnus pour leurs propriétés antivirales, anti-inflammatoires et immunomodulatrices (Pugh *et al* ., 2001) . Les monosaccharides majoritaires incluent le glucose, le rhamnose, la xylose, le mannose et le galactose (Pugh *et al* ., 2001) . Ces polysaccharides complexes contribuent à l'intégrité de la paroi cellulaire et pourraient influencer certaines bio-activités de la spiruline (Chen *et al* ., 2020) .

Un polysaccharide sulfaté particulier, le calcium spirulan (Ca-SP), est également présent dans la paroi cellulaire et joue un rôle clé dans ses effets biologiques (Hatashi *et al* ., 1996) . En parallèle, la spiruline contient aussi des glucides de faible poids moléculaire, comme le glycogène, qui sert de réserve d'énergie (Markou, 2012) .

II.1.4 Les Pigments bioactifs

La spiruline renferme trois pigments naturels principaux aux teintes distinctes : le bleu, le vert et l'orange, correspondant respectivement aux phycocyanines, aux chlorophylles et aux caroténoïdes (Marzorati *et al* ., 2020) .

II.1.4.1. La phycocyanine

La phycocyanine est un pigment exceptionnel présent dans la composition de la spiruline (Sguera ., 2008) . Responsable de sa teinte bleutée, elle est reconnue comme l'un des antioxydants et agents anti-radicaux les plus puissants . Elle joue un rôle essentiel dans le renforcement des défenses immunitaires, stimule la production de globules rouges, soutient l'activité musculaire, inhibe la prolifération des cellules cancéreuses et contribue à la détoxification de l'organisme en éliminant les substances chimiques nocives (Shmitz, 2014) .

II.1.4.2. Chlorophylle

La chlorophylle est un pigment liposoluble omniprésent, essentiel à la photosynthèse, que l'on retrouve dans la plupart des plantes, algues et cyanobactéries . La micro algue verte *Chlorella* sp est d'ailleurs surnommée «nourriture émeraude» en raison de sa forte concentration en chlorophylle (Odjadjare *et al* ., 2017) . Des études ont montré que la chlorophylle, sous ses formes a et b, en mélange, possède des propriétés chimio-préventives, notamment par l'augmentation de l'activité de la glutathion S-transférase, l'inhibition de l'enzyme cytochrome P450 et la modulation de la différenciation cellulaire, bien qu'elle puisse également induire un arrêt mitotique et une nécrobiose (Mishra *et al* ., 2011) .

Ce pigment a acquis une importance particulière en tant que colorant alimentaire et pour son potentiel chimio-thérapeutique, ce qui en fait un ingrédient utilisé en médecine (Khanra *et al* ., 2018) . De plus, la chlorophylle entre dans la composition de divers produits de santé et d'hygiène, notamment les déodorants, les antitranspirants, les pastilles et les formulations destinées à lutter contre les mauvaises odeurs .

II.1.4.3. Caroténoïdes

Les caroténoïdes sont des pigments hydrophobes auxiliaires impliqués dans la capture de la lumière. Ils possèdent une structure à 40 atomes de carbone dérivée de l'unité isoprène et jouent un rôle clé en tant qu'antioxydants. Leur action permet de neutraliser les radicaux libres et de limiter les dommages oxydatifs au niveau des cellules, des tissus et des membranes (**Rajesh et al**., 2017).

À ce jour, environ 400 caroténoïdes ont été identifiés dans divers organismes vivants. Parmi ceux qui sont les plus largement commercialisés figurent le β -carotène, l'astaxanthine, la lutéine, la fucoxanthine, la zéaxanthine, l'anthéroxanthine, la violaxanthine, la néoxanthine, la loroxanthine, la diadinoxanthine, la diatoxanthine et la siphonéine (**Galasso et al**., 2019).

L'astaxanthine (ASX), un pigment xanthophylle de couleur rouge, représente le cétocaroténoïde le plus exploité industriellement, avec une valeur marchande estimée à 200 millions USD (**Capelli et al**., 2019). Son pouvoir antioxydant est exceptionnel : il est 100 fois plus puissant que l'alpha-tocophérol, 6000 fois plus efficace que la vitamine C, 800 fois plus puissant que la coenzyme Q10, 550 fois plus efficace que la vitamine E, 200 fois plus actif que les polyphénols, 150 fois plus puissant que les anthocyanes et 75 fois plus efficace que l'acide alpha-lipoïque (**Talukdar et al**., 2020).

La lutéine, un caroténoïde doré, affiche une production annuelle estimée entre 70 et 150 tonnes/ha, soit 11,5 à 25 fois plus que celle issue du souci (*Tagetes erecta*), qui atteint 6 tonnes/ha. Sa valeur marchande s'élève à environ 3,14 millions USD (**Lin et al**., 2015). Elle présente une activité antioxydante supérieure au β -carotène, contribuant à réduire les dommages oxydatifs et à protéger les bicouches lipidiques des membranes cellulaires (**Sanzo et al**., 2018).

II.1.5. Les vitamines

La spiruline est une source riche en vitamines, constituant la deuxième source de vitamine B1 après la levure de bière. Elle contient également une quantité significative de provitamine A, de vitamine B12 et de β -carotène (**Cruchot, 2008**). Elle est également une excellente source de β -carotène, précurseur de la vitamine A, qui joue un rôle clé dans la vision, la régénération cellulaire et le renforcement du système immunitaire (**Miranda, 1998**).

Chapitre II la biochimie et les activités de *Arthrospira platensis*

Le β -carotène représente entre 40 et 80 % des caroténoïdes présents dans la spiruline . Chez l'être humain, sa conversion en vitamine A s'effectue à un taux de 17 à 20 % en moyenne, bien que cette proportion puisse varier en fonction de la quantité absorbée et de l'état physiologique de l'individu .

Ainsi, la consommation de quelques grammes de spiruline suffit à couvrir entièrement les besoins quotidiens en vitamine A d'un adulte (**Flaquet et Hurni, 2006**) .

Parmi ces vitamines, la B12 est la plus abondante dans la spiruline . Elle est particulièrement précieuse pour les personnes suivant un régime végétarien ou végétalien, car elle est rarement présente dans les aliments d'origine végétale . En effet, la spiruline contient jusqu'à quatre fois plus de vitamine B12 que le foie cru, longtemps considéré comme la meilleure source de cette vitamine (**Jourdan, 2006**) .

La spiruline contient de la vitamine E en quantités comparables à celles des germes de blé . Les vitamines A et E, reconnues pour leurs propriétés antioxydantes, jouent un rôle essentiel chez l'homme . Elles contribuent non seulement à la protection des cellules contre le stress oxydatif, mais permettent également de préserver d'autres composants de la spiruline, tels que les acides gras . Toutefois, ces vitamines étant sensibles aux conditions de transformation, leur conservation optimale dépend des méthodes de fabrication employées . Un séchage à basse température et une granulométrie plus grossière permettent ainsi de limiter leur dégradation (**Pierlovisi, 2008**) .

L'apport vitaminique de la spiruline est estimé comme suit :

- Vitamine A : 100 à 240 UI/g
- Vitamine B1 : 3 à 4 mg/g
- Vitamine C : 20 mg/g
- Vitamine E : 0,1 mg/g (**Salle et al., 1999**) .

Tableau04:Teneursenvitamine(mg/kg) dematièresèchedelaSPIRULINE .

Vitamines	Teneur(mg/kg dematière sèche)	Besoin/jour(mg pourun adulte)
βcarotène(pro-A)	1700	/
Thiamine(B1)	55	1 .5
Riboflavine(B2)	40	1 .8
Pyridoxine(B6)	3	2
Cyanocobalamine(B12)	0 .4	0 .003
Acideascorbique(C)	90	15-30
Tocophérol(E)	190	/
Acidenicotinique(PP)	118	/
Acide folique	0,5	0,4
Inositol	350	/
δ-Ca-Panthoténate	11	6-10
Biotine (H)	0,4	0 .1-0 .3

II.1.6. Les minéraux et les oligoéléments

En plus de son apport en vitamines, la spiruline est particulièrement riche en minéraux, le fer étant l'un des plus notables (**Wild et al .,2018**) . Sa teneur en fer varie entre 28 et 50 mg pour

100 g de poids sec, faisant d'elle une source précieuse, notamment pour les personnes souffrant d'anémie ferriprive (**Liestianty et al .,2019; Moradi et al .,2023**) Elle contient également d'autres minéraux essentiels tels que le calcium, le magnésium, le zinc et le potassium, qui jouent un rôle clé dans l'homéostasie cellulaire et le soutien des fonctions métaboliques (**Liestianty et al .,2019**) . De plus, la biodisponibilité élevée de ces minéraux dans la spiruline renforce l'intérêt nutritionnel, qu'elle soit tant que complément alimentaire ou ingrédient intégral d'alimentation .

ChapitreII labiochimieetlesactivitésd'Arthrospiraplatensis

Les minéraux et les oligoéléments présentes dans la spiruline sont regroupés dans le tableau ci-dessous (Vicat *et al* ., 2016)

Tableau05:Teneurmoyenneet principalesfonctionsdesminérauxet desoligoélémentsdela Spiruline .

Minérauxet oligoéléments	Teneurmoyendans10g despiruline	Principalesfonctions
Calcium	130 (10%des AJR)	Edification et renouvellementdu squelette . -Rythmecardiaque,système nerveux .
Phosphate	67mg(8%desAJR)	-Masse minérale du squelette osseux . -Réactionsbiochimiquede l'organisme .
Fer	7-18mg(50à100%des AJR)	Fabrication et fonctionnementde l'hémoglobine . -Constitution de myoglobine .
Zinc	0 .4mg(4%desAJR)	-Activationdeplusde200 enzymes .
Magnésium	25-50mg(9-25 %desAJR)	-Masse minérale du squelette osseux . -Métabolismeglucidiqueet lipidique (muscle,cœuraxenerveux) .
Potassium	100-200 mg (5-10%des AJR)	-Perméabilité des membranes .

		-Régulation du rythme cardiaque .
Sodium	0 .09mg	-Régulation pression osmotique -Maintien de l'équilibre hydro-électrolytique et de la masse hydrique .
Sélénium	0 .1-2 .55mg(20-100%des AJR)	-Cofacteur des enzymes anti oxydantes . -Stimulant de l'immunité .
Cuivre	0 .1mg (5%des AJR)	-Cofacteur de nombreuses enzymes . -Anti-inflammatoire, antioxydant .
Manganèse	0 .4mg(12%des AJR)	-Formation des os et des enzymes . -Métabolisme protéines, lipides, glucides . -Stabilise le taux de glucose sanguin .
Chrome	0 .03-0 .25mg(16%des AJR)	-Métabolisme glucides, lipides ,acides nucléique, cholestérol .

Le fer

La spiruline se distingue par sa teneur exceptionnellement élevée en fer (550-6000mg/kg), un atout d'autant plus important que les carences en fer, notamment les anémies ferriprives, sont fréquentes, en particulier chez les femmes et les enfants . De plus, les sources alimentaires riches en fer sont rares . À titre de comparaison, les céréales complètes, considérées parmi les meilleures sources de fer, n'en contiennent que 150 à 250 mg/kg (**Falquet et Hurni, 2006**) .

Le zinc

Le zinc joue un rôle essentiel dans la croissance, le développement cognitif et le fonctionnement moteur, en particulier chez l'enfant (**Black, 2003**) . Après la vitamine A, le fer et l'iode, il est désormais considéré comme un élément clé dans la lutte contre la malnutrition, occupant probablement la quatrième place parmi les micronutriments les plus importants (**Gibson, 2005**) . La spiruline cultivée sans ajout intentionnel de zinc ne contient qu'une quantité infime de cet élément (21-40 µg/g), tandis que certaines spirulines naturelles peuvent en atteindre environ 400 µg/g . Toutefois, ces concentrations restent insuffisantes pour faire de la spiruline une bonne source de zinc . En effet, les apports journaliers recommandés (AJR) varient de 0,6 à 3 mg/j chez les nourrissons et les enfants (selon le régime alimentaire), de 4 à 12 mg/j chez les adolescents et de 3 à 8 mg/j chez les adultes (**Falquet et Hurni, 2006**) .

Le potassium

La spiruline est une source abondante de potassium, un avantage notable dans les pays industrialisés où l'équilibre entre sodium et potassium est souvent déséquilibré (**Pierlovisi, 2008**) .

Le calcium et le phosphore

Le calcium et le phosphore sont présents en proportions similaires à celles du lait . Leur équilibre contribue au maintien de la santé osseuse et aide à prévenir la décalcification (**Ahounou, 2018**) .

II.2. Les activités biologiques de la spiruline

II.2.1 L'activité anti-oxydante

Un antioxydant est une substance qui, même en faible concentration par rapport au substrat oxydable, ralentit ou empêche significativement l'oxydation de ce dernier .

L'intérêt pour ces composés ne cesse de croître, car les formes réactives de l'oxygène, telles que les radicaux superoxydes, hydroxyles, alkoxydes et peroxydes, ainsi que le peroxyde d'hydrogène et l'oxygène singulet, sont en partie impliquées dans le développement de diverses maladies, notamment la maladie de Parkinson, la maladie d'Alzheimer, l'artériosclérose, la polyarthrite

chronique, le mongolisme et le cancer . De plus, ces espèces réactives jouent un rôle dans le processus de vieillissement (TIMBO, 2003) .

II.2.2 L'activité antimicrobienne

Des études in vitro préliminaires sur les extraits de spiruline ont mis en évidence une activité antimicrobienne efficace contre certaines bactéries pathogènes, notamment *Escherichia coli* et *Staphylococcus aureus* (Qureshi et Hunter, 1995) . Ces résultats suggèrent que cette cyanobactérie possède un mécanisme de défense naturel lui permettant de lutter contre les agents pathogènes . Cette propriété ouvre des perspectives intéressantes pour le développement d'un antibiotique d'origine végétale, potentiellement plus sûr et présentant moins d'effets secondaires que les médicaments synthétiques (Al-Ghanayem, 2017) .

Toutefois, les différentes études menées sur les extraits de spiruline n'ont pas encore permis d'identifier une molécule antibactérienne spécifique . Néanmoins, elles indiquent un spectre d'action antimicrobienne prometteur, pouvant servir de base à des recherches approfondies sur l'efficacité de la spiruline contre certains germes pathogènes (Kaushik et Chauhan, 2008) .

II.2.3 L'activité anti-cancéreuse

La spiruline possède un potentiel anticancéreux, tant préventif que curatif, grâce à sa composition riche en composés bioactifs :

- Les polysaccharides : Ils renforcent l'activité enzymatique des endonucléases, des enzymes essentielles à la réparation des dommages de l'ADN pouvant conduire au développement du cancer .

- Le spirulanecalcique (Ca-SP) : Ce polysaccharide a démontré, à une dose de 100 mg en injection intraveineuse, une réduction significative des métastases pulmonaires dans les cellules tumorales pulmonaires établies . Son action repose sur l'inhibition de l'invasion tumorale, en limitant la formation de colonies cellulaires et en perturbant les mécanismes d'adhésion et de migration tumorale (Ismail MF et al ., 2009) .

- Les antioxydants : Le bêta-carotène, un puissant antioxydant présent dans la spiruline, a été reconnu pour son rôle dans l'inversion du processus cancéreux et l'inhibition de la prolifération

des cellules cancéreuses. Une étude menée sur des patients atteints de leucoplasie buccale, un état précancéreux, a révélé qu'une consommation quotidienne d'1 g de spiruline pendant un an a permis une amélioration significative de leur état, stoppant ainsi la progression de la maladie. Par ailleurs, la phycocyanine, un autre composé clé de la spiruline, joue un rôle majeur en neutralisant les radicaux libres, contribuant ainsi à la prévention du cancer (**Vidal, 2015**).

II.2.4. L'activité antivirale

Depuis 1989, un groupe de chercheurs de la faculté de médecine de Harvard a mis en évidence les propriétés antivirales de la spiruline, en particulier celles de son composant, le calcium-spirulan (Ca-SP). Des études *in vitro* ont montré que de faibles concentrations d'extraits de spiruline réduisent significativement la réplication du VIH, tandis que des doses plus élevées parviennent à l'interrompre complètement.

Le mécanisme d'action de la spiruline repose sur son inhibition de la pénétration du virus dans la membrane cellulaire, empêchant ainsi sa réplication. Le virus reste confiné dans la circulation extracellulaire et est progressivement éliminé par le système immunitaire. De plus, une étude comparative entre le Ca-SP et le sulfate de dextrane, un antiviral reconnu contre le VIH, a révélé une efficacité 4 à 5 fois supérieure du Ca-SP. Ce dernier agit en ciblant l'absorption, la pénétration et plusieurs étapes de la réplication virale (**Hayal et al., 1995**).

Par ailleurs, le Ca-SP a démontré une activité antivirale contre le VIH ainsi que contre le virus de l'herpès simplex de type 1 (HSV-1), ce qui en fait un candidat potentiel pour le développement de traitements antirétroviraux. Son action antivirale a également été testée *in vitro* sur d'autres virus enveloppés (**Hernandez-Corona et al., 2002**). À cet effet, ces virus ont été exposés à une solution obtenue à partir de 100 g de spiruline dissous dans trois volumes de 500 ml d'eau. Les résultats obtenus sont regroupés dans le **tableau 6**.

Tableau 06: Synthèse de l'activité antivirale de la spiruline contre différents virus

Virus	Cytotoxicité DI ₅₀ (mg/ml)	Activité antivirale DE ₅₀ (mg/ml)	Index de sélectivité (ID/ED)
HSV-2	8,9±0,16	0,069±0,0015	128
PRV pseudorange	7,9±0,12	0,103± 0,002	76
CMV	2,2±0,16	0,142± 0,001	15
HSV-1	8,9±0,16	0,333±0,01	26
Adénovirus, poliovirus 1, rotavirus SA-11, Measles vaccine virus, SSPE, VSV	8,9±0,16	NA	/

Remarque

- DI₅₀: Concentration entraînant l'inhibition de 50% des cellules .
- DE₅₀: Concentration minimale nécessaire pour réduire l'infection de 50% .

II .2 .5 L'activité anti-inflammatoire

La spiruline possède un fort potentiel biologique grâce à sa richesse en protéines et en acides gras essentiels, notamment les oméga-3 et oméga-6, que l'organisme ne peut pas synthétiser lui-même . Ces acides gras jouent un rôle clé en tant que précurseurs des prostaglandines, des molécules reconnues pour leurs propriétés anti-inflammatoires et immunostimulantes (**Charpy et al ., 2008**) .

Laphycocyanine, un pigment rouge dans la nature, représente environ 12,6% à 20% du poids sec de la spiruline (**Patel S . et Goyal A ., 2013**) . Ce composé bioactif inhibe la production de cytokines pro-inflammatoires telles que le TNF- α (Tumor Necrosis Factor α) et réduit l'expression de la cyclooxygénase-2 (COX-2), une enzyme clé dans les processus inflammatoires . Il diminue ainsi la production de prostaglandine E, un médiateur de l'inflammation . De plus, laphycocyanine favoriserait la production de globules rouges et blancs, contribuant ainsi au renforcement du système immunitaire (**Goulambasse, 2018**)



Deuxième Partie

Étude expérimentale



Chapitre I

Matériau et méthodes

La partie expérimentale a été réalisée dans les laboratoires de la Faculté des sciences de la nature et de la vie de l'Université de 08 mai 1945 pendant la période allant de mars 2025 à avril 2025.

I. Matériel

I.1. Matériel Biologique

Le matériel biologique utilisé dans ce travail est un échantillon de biomasse sèche de la souche *Arthrospira platensis* obtenue à partir de biofarm Al-kiram de la région de Biskra. Le choix de cette matière biologique est principalement dû à la richesse de ce type de composés bioactifs.



Figure 6: Spiruline en poudre cultivée dans la région de Biskra

I.2. Les équipements et les réactifs utilisés

Les instruments de laboratoire, les verreries, les réactifs chimiques, les solvants et les équipements techniques nécessaires à la réalisation des analyses ont été utilisés tout au long de cette étude. **Tableau (07)**.

Tableaux 07 : Liste du matériel non biologique utilisé lors de l'étude

Appareillage		
Autoclave	Agitateur	Rotavapeur
Etuve de séchage	Balance analytique	Spectrophotomètre
Bain marie	Balance de précision	Soxhlet
Vortex	Centrifugeuse	
Verreries et instruments		
Béchers	Papiers aluminium	Tubes à essai & support
Coton	Erlenmeyer	Flacons
Éprouvette graduée	Entonnoir	Lescuves
Verre de montre	Pissette	Papier Whatman
Boîte de pétri	Spatule	Micropipette
Centrifuge tubes	Tubes à essai/ Support	
Solutions/Réactifs		
Solvant hydro-éthanolique (80:20 V/V)	Extraction hydroalcoolique	
Acide sulfurique concentré (H₂SO₄)	Dosage des sucres (méthode Dubois)	
Phénol 5 %	Dosage des sucres	
Glucose 0,01 %	Gamme étalon pour les sucres	
Solution de biuret	Dosage des protéines	

Solution de BSA (albumine bovine)	Gamme étalon des protéines
Hexane/Chloroforme	Extraction des lipides
Acétone	Rinçage après extraction des lipides
Éthanol 95 %	Précipitation des protéines
Solution de folin-ciocalteu	Dosage des polyphénols
Carbonate de sodium (Na_2CO_3) 7,5 %	Dosage des polyphénols
Solution de nitrite de sodium (NaNO_2) 5 %	Dosage des flavonoïdes
Solution de trichlorure d'aluminium (AlCl_3) 10 %	Dosage des flavonoïdes
Solution de NaOH (1M)	Dosage des flavonoïdes
Solution DPHH 0,1mM	Test d'activité antioxydant
Solution standard d'acide ascorbique	Référence pour l'activité antioxydant

II. Méthodes

II.1 Préparation de l'extrait hydro-alcoolique

Une quantité déterminée de poudre de microalgue (rapport 1:10 p/v) a été mise en macération dans un solvant (80:20 V/V) sous agitation continue, à l'abri de la lumière, pendant 24 heures. Après filtration à l'aide d'un papier Whatman, le résidu solide a subi une seconde extraction dans les mêmes conditions. Les filtrats obtenus ont été combinés, puis concentrés sous pression réduite à l'aide d'un évaporateur rotatif (Rotavapeur) à 45-50°C, jusqu'à obtention d'un extrait pâteux stable en poids.

Le rendement d'extraction a été calculé selon la formule suivante:

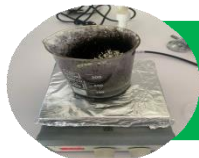
$$\text{Rendement de l'extraction (\%)} = (\text{poids de l'extrait (g)} / \text{poids de la poudre sèche de plante (g)}) * 100$$



Figure 7: Évaporation sous vide à l'aide d'un rotavapour



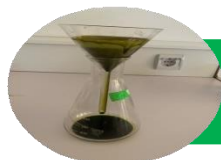
Matériel biologique: Poudre de spiruline 10g



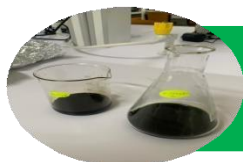
Extraction hydro-alcoolique éthanol/eau (80:20 V/V)



Macération 48h



Filtration



Filtrat



Evaporation par rotavapeur



L'extrait brut de la spiruline

Figure 8 : Les étapes d'extraction hydro-alcoolique des extraits brutes à partir de la poudre de spiruline par macération

II.2. Dosage des sucres totaux

La quantification des sucres totaux a été réalisée selon la méthode colorimétrique de **Dubois et al.**, (1956).

Principe

La méthode colorimétrique de **Dubois et al.** (1956) est couramment utilisée pour la quantification des glucides totaux, en particulier les sucres réducteurs, dans différents types d'échantillons biologiques et alimentaires. Elle repose sur la réaction entre les sucres présents dans l'échantillon et un mélange de phénol et d'acide sulfurique, conduisant à la formation d'un complexe coloré de teinte jaune-orangé. L'intensité de cette coloration, mesurée spectrophotométriquement à 490 nm, est proportionnelle à la concentration en sucres. Cette méthode est appréciée pour sa simplicité, sa sensibilité et sa reproductibilité dans l'analyse des glucides (**Dubois et al.**, 1956).

- 200 µl de la solution d'extrait (0,01%) ont été placés dans des tubes en verre.
- 200 µl de la solution de phénol à 5% ont été ajoutés.
- 1 ml d'acide sulfurique concentré a ensuite été ajouté.
- Après homogénéisation (vortex), les échantillons ont été incubés au bain-marie à 90°C pendant 5 minutes.
- Après refroidissement à température ambiante dans l'obscurité pendant 30 minutes, l'absorbance a été mesurée à 490 nm à l'aide d'un spectrophotomètre UV-Visible.

Une gamme étalon a été préparée à partir d'une solution de glucose (0,01%) afin de déterminer la concentration des sucres présents dans l'échantillon.

II.3. Dosage des protéines (méthode de Biuret)**Principe**

La méthode du Biuret est une technique colorimétrique utilisée pour doser les protéines totales dans une solution. En milieu alcalin, les liaisons peptidiques des protéines réagissent avec les ions cuivre (Cu^{2+}) pour former un complexe violet. L'intensité de cette coloration, mesurée à 540 nm, est proportionnelle à la concentration en protéines. Cette méthode est simple, rapide et adaptée à

l'analyse de sérums ou d'extraits biologiques, bien qu'elle soit moins sensible que d'autres techniques comme celle de Lowry (**Gornall, Bardawill & David, 1949**) .

Une solution de Biuret a été préparée en dissolvant :

1,5 g de sulfate de cuivre (CuSO_4) et 6 g de tartrate double de sodium et potassium ($\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) dans 500 ml d'eau distillée,

- 1 g d'iodure de potassium (KI),
- 300 ml de NaOH à 10%, complété à 1 mL avec de l'eau distillée .

Pour le dosage :

- 1 ml de l'extrait dilué (10 mg/100 ml) a été mélangé avec 2 ml de la solution de Biuret .
- Après agitation, l'échantillon a été laissé au repos dans l'obscurité pendant 30 minutes .
- L'absorbance a été mesurée à 550 nm contre un blanc .
- La concentration en protéines a été déterminée en utilisant une gamme étalon de BSA (Albumine de Sérum Bovin) .

II.4 Détermination de la teneur en lipides

Pour éliminer les lipides, 5 g de poudre de spiruline ont été extraits avec 150 ml d'hexane pendant 3 heures à l'aide d'un appareil Soxhlet . Après séchage, la biomasse délipidée a été macérée avec un mélange éthanol/eau pour extraire les composés bioactifs . L'hexane a été évaporé au rotavap, et les lipides récupérés . La teneur en lipides a été calculée selon la formule classique .

(**Luque de Castro et García-Ayuso, 1998**)

la teneur en lipides a été déterminée par la formule suivante :

$$\text{Teneur en lipide \%} = ((\text{poids de lipides (g)}) / \text{poids matière sèche (g)}) * 100$$



Figure 9 : Montage de l'extracteur de soxhlet utilisé pour l'extraction des lipides

Figure prise au laboratoire lors de l'extraction des composés lipidiques de la spiruline

II.5 Détermination de la teneur en matière sèche et en humidité

Ces deux paramètres ont été déterminés après un séchage à 103 ± 2 °C jusqu'à l'obtention d'un poids constant .

- La teneur en matière sèche (MS) a été calculée selon la formule suivante:

$$MS(\%) = \left(\frac{\text{Poids après séchage}}{\text{Poids avant séchage}} \right) \times 100$$

- Quant à la teneur en humidité, elle a été déterminée à l'aide de la formule suivante:

$$\text{Humidité}(\%) = \left(\frac{\text{Poids avant séchage} - \text{Poids après séchage}}{\text{Poids avant séchage}} \right) \times 100 .$$

II.6. Purification de l'extrait

L'extrait hydro-éthanolique (80:20 v/v) obtenu peut contenir des traces de lipides et de protéines, dont la quantité dépend des caractéristiques de la plante et du mode d'extraction . Pour affiner l'extrait, deux étapes de purification ont été effectuées

II.6.1. Élimination des lipides (Défatage)

Une extraction au solvant apolaire a été réalisée selon le protocole suivant:

- Ajouter un solvant non polaire (hexane) dans un rapport 1:1 avec l'extrait .
- Agiter vigoureusement pour favoriser le contact entre les phases .
- Laisser décanter, puis séparer la phase organique contenant les lipides .
- Récupérer la phase hydro-éthanolique purifiée pour les analyses ultérieures .

II.6.2. Élimination des protéines

Si l'extrait contient des protéines, celles-ci ont été précipitées à l'aide de solvants organiques selon l'une des méthodes suivantes :

- Ajouter trois volumes d'éthanol à 95% à l'extrait .
- Incuber à -20°C pendant 12 heures pour favoriser la précipitation .
- Centrifuger à 10000 g pendant 20 minutes .
- Filtrer et récupérer le surnageant contenant les composés d'intérêt .

II.7. Analyse quantitative des métabolites secondaires**II.7.1. Dosage des polyphénols**

- 200 µl d'extrait ont été mélangés avec 1 ml du réactif de Folin-Ciocalteu (dilué au 1/10 dans l'eau distillée) .
- Après 5 minutes d'incubation, 800 µl de carbonate de sodium (Na_2CO_3) à 7,5% ont été ajoutés .
- L'échantillon a été incubé au bain-marie (30°C, 30 min) dans l'obscurité .
- L'absorbance a été mesurée à 765 nm .

- La concentration en polyphénols a été calculée en mg d'équivalent acide gallique (EAG) par g d'extrait à partir d'une gamme étalon d'acide gallique .

II.7.2. Dosage des flavonoïdes

- 500 µl d'extrait ont été dilués avec 1,5 ml d'eau distillée .
- 150 µl de nitrite de sodium (NaNO_2 , 5%) ont été ajoutés et incubés 6 min .
- 150 µl de chlorure d'aluminium (AlCl_3 , 10%) ont été ajoutés, puis incubés 5 min .
- 500 µl de NaOH (1M) ont été ajoutés avant mesure de l'absorbance à 510 nm .
- La concentration a été déterminée en mg d'équivalent quercétine (EQ) par g d'extrait .

II.8. Analyse phytochimique qualitative

La phytochimie qualitative repose sur des réactions colorées ou de précipitation utilisant des réactifs chimiques spécifiques . Ces tests sont réalisés sur des extraits reconstitués à partir de la poudre lyophilisée de chaque échantillon afin d'obtenir une première estimation des constituants présents . Parmi les principaux groupes phytochimiques identifiés, on retrouve notamment les alcaloïdes, les polyphénols (flavonoïdes, anthocyanes, tanins), les saponosides, les stéroïdes, les coumarines et les terpènes (**Bougandoura, 2010**) .

II.8.1. Stérols et triterpènes

10 ml d'extrait éthanolique sont versés dans un erlenmeyer, puis évaporés à sec . Le résidu obtenu est ensuite dissous dans 5 ml de chloroforme . On prélève 5 ml de cette solution que l'on mélange à 5 ml d'anhydride acétique, puis on ajoute quelques gouttes d'acide sulfurique concentré sous agitation . L'apparition d'une coloration violacée passagère virant au vert indique un test positif (**Trease et Evans, 1987**) .

II.8.2. Les coumarines

La détection des coumarines s'effectue en ajoutant 3 ml de NaOH à 10% à 2 ml d'extrait placés dans un tube . Après agitation, l'apparition d'une coloration jaune témoigne de la présence de coumarines (**Seladji et al ., 2013**) .

II.8.3. Les mucilages

Pour la détection des mucilages, 1 ml d'extrait est introduit dans un tube à essai, puis on ajoute 5 ml d'éthanol absolu. Après environ dix minutes, la formation d'un précipité floconneux indique la présence de mucilages (**Békro et al.**, 2007).

II.8.4. Terpénoïdes

5 ml d'extrait sont mélangés à 2 ml de chloroforme, puis 2 ml d'acide sulfurique concentré sont ajoutés délicatement. La formation de deux phases distinctes accompagnée d'une coloration brune à l'interface révèle la présence de terpénoïdes (**Karumi et al.**, 2004 ; **Benariba et al.**, 2013).

II.8.5. Saponosides

Saponosides repose sur la formation de mousse. Pour cela, 5 ml de l'extrait aqueux sont versés dans un tube à essai, puis agités vigoureusement pendant 15 secondes. Après un repos de 15 minutes, la présence d'une mousse persistante d'une hauteur supérieure à 1 cm indique la présence de saponosides (**Karumi et al.**, 2004 ; **Benariba et al.**, 2013).

II.8.6 Glucides

Les échantillons sont étendus dans 5 ml d'eau distillée puis filtrés. Les filtrats obtenus sont servi pour la détection des glucides.

Test de Fehling

Une portion du filtrat a été mélangée à parts égales avec les solutions de Fehling A (sulfate de cuivre) et Fehling B (tartrate de sodium et de potassium en solution alcaline), puis le tout a été chauffé au bain-marie. L'apparition d'un précipité rouge brique indique la présence de sucres réducteurs (**Harborne, 1998**).

II.8.7. Composés phénoliques

Test au chlorure ferrique Un volume de 2 ml d'extrait végétal est porté à ébullition douce dans de l'eau et chauffé à une température de 45–50 °C. Ensuite, 2 ml d'une solution de chlorure ferrique (FeCl₃) à 0,3 % sont ajoutés. L'apparition d'une coloration vert foncé ou bleue révèle la présence de composés phénoliques (**Trease & Evans, 1989**).

II.8.8. Flavonoïdes

Test au réactif alcalin: Le test se pose sur l'ajout de quelques gouttes d'hydroxyde de sodium (2 %) à l'extrait . Une coloration jaune intense apparaît en présence de flavonoïdes et disparaît après addition de quelques gouttes d'acide chlorhydrique dilué, confirmant leur présence (**Trease & Evans, 1989**) .

II.8.9. Lipide

Quelques gouttes de l'extrait sont déposées sur un papier filtre, puis laissées à sécher à l'air libre . L'apparition de taches translucides persistantes indique la présence de lipides (**Edeoga et al ., 2005**) .

II.9. Etude de l'activité biologique de la spiruline**II.9.1. Activité antioxydante****Principe du test DPPH**

Le DPPH (1,1-Diphényl-2-picrylhydrazyl) est un radical libre stable de couleur violette, présentant une absorption maximale à 517 nm . En présence de composés antioxydants, ce radical est réduit, ce qui entraîne un changement de couleur de la solution, passant du violet au jaune . La diminution de l'absorbance à 517 nm est mesurée à l'aide d'un spectrophotomètre et permet de calculer le pourcentage d'inhibition du radical DPPH . Ce pourcentage est directement proportionnel au pouvoir antiradicalaire de l'échantillon (**Parejo et al ., 2002**) .

Cette méthode repose sur la capacité des antioxydants à neutraliser le radical libre DPPH . L'effet antiradicalaire de chaque extrait a été évalué selon la procédure décrite par (**Benhammou et al ., 2007**), en mesurant la réduction de l'absorbance à 517 nm après incubation avec la solution de DPPH .

Mise en œuvre pratique

Dans cette étude, l'acide ascorbique (vitamine C) a été utilisé comme antioxydant de référence (standard) pour l'évaluation de l'activité antioxydante par la méthode DPPH. Une solution standard d'acide ascorbique a été préparée à différentes concentrations afin d'établir une courbe d'étalonnage. Cette courbe a permis d'exprimer les résultats obtenus en mg équivalent acide ascorbique par gramme d'échantillon (mg AAE/g).

L'utilisation de l'acide ascorbique comme référence est largement reconnue et adoptée dans plusieurs études, notamment celle de **Brand-Williams *et al***, (1995), qui ont développé cette méthode pour mesurer la capacité de piégeage des radicaux libres.

L'activité antioxydante de l'extrait a été évaluée à l'aide du radical libre 2,2-diphényl-1-picrylhydrazyle (DPPH). Différentes concentrations de l'extrait ont été testées: 0,34 mg/ml, 0,86 mg/ml, 1,21 mg/ml, 2,15 mg/ml et 5 mg/ml. Pour chaque concentration, un volume de 200 µL de solution de l'extrait a été mélangé à 800 µL de la solution de DPPH à 0,1 mM (préparée dans du méthanol). Après une incubation de 30 minutes à l'obscurité, l'absorbance a été mesurée à 517 nm.

Un blanc a été préparé en mélangeant 800 µL de DPPH avec 200 µL de solvant (méthanol ou éthanol, selon l'extrait). L'échantillon témoin a été préparé en mélangeant 800 µL de méthanol avec 200 µL de l'extrait.

Le pourcentage d'inhibition du radical libre DPPH a été calculé afin d'évaluer la capacité antioxydante de l'extrait de *Spirulina platensis*. La méthode consiste à mesurer la diminution de l'absorbance du DPPH à 517 nm en présence de l'extrait.

Le pourcentage d'inhibition a été déterminé à l'aide de la formule suivante:

$$(\text{DO contrôle} - \text{DO échantillons}) / \text{DO contrôle} * 100$$

DO contrôle : est l'absorbance de la solution de DPPH seule

DO échantillons: est l'absorbance en présence de l'extrait

II.9.2. Activité antibactérienne

➤ Antibiotiques de référence (contrôle positif)

Pour évaluer l'activité antibactérienne des extraits de spiruline, des antibiotiques ont été utilisés comme référence afin de comparer leur efficacité avec celle des extraits testés.

Il s'agit de la gentamicine et de la rifampicine pour *Escherichia coli* et *Pseudomonas aeruginosa*, ainsi que de la céfoxitine et de la rifampicine pour *Staphylococcus aureus*.

• Solutions de spiruline brute

Des solutions aqueuses de spiruline ont été préparées à différentes concentrations: 100 %, 75%, 50 % et 25 % (spiruline diluée dans de l'eau distillée stérile).

➤ Test d'antibiogramme

Méthode suivie selon la standardisation **Medveto(2008)**.

• Milieu de culture

Gélose Mueller-Hinton (MH), coulé dans des boîtes de Petri sur une épaisseur uniforme de 4 mm. Les

boîtes sont laissées à solidifier avant utilisation.

• Préparation de l'inoculum

- À partir de cultures pures des cinq espèces bactériennes testées (voir **Tableau 08**), prélever quelques colonies bien isolées à l'aide d'une anse de platine.
- Les déposer dans 5 à 10 mL d'eau physiologique stérile à 0,9 %.
- Homogénéiser pour obtenir une suspension dont la turbidité équivaut à l'échelle 0,5 McFarland.
- Ajuster si nécessaire avec de l'eau physiologique ou de la culture.
- L'ensemencement doit être réalisé dans les 15 minutes suivant la préparation.

Tableau 08: liste des souches bactériennes étudiées.

Genre et espèce	N° ATCC	Gram	Famille
<i>Escherichia coli</i>	25922	-	Enterobacteriaceae
<i>Staphylococcus aureus</i>	25923	+	Staphylococcaceae

<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	25959	-	pseudomonadacées
-------------------------------	-------	---	------------------

- **Ensemencement et dépôt des extraits**

- Ensemencer uniformément la surface de la gélose avec un écouvillon imbibé de l'inoculum .
- Laisser sécher les boîtes pendant 5 minutes .
- Pour chaque boîte, recharger l'écouvillon entre les ensemencements .
- Imprégner des disques stériles de papier (Whatman, 7 mm de diamètre) avec 10 µl de chaque extrait à tester . Voici une reformulation claire et structurée du passage

- **Dépôt des extraits et des disques d'antibiotiques**

À l'aide d'une pince stérile, déposer délicatement les disques imprégnés d'extrait à la surface de la gélose, en veillant à bien les presser afin d'assurer un bon contact avec le milieu .

➤ **Application des disques d'antibiotiques**

Ne pas placer plus de 6 disques d'antibiotiques sur une boîte de Petri de 90 mm de diamètre .

Les disques doivent être espacés de 24 mm, de centre à centre .

Chaque disque est appliqué avec une pince bactériologique stérile, en pressant doucement pour le fixer en place . Une fois posé, il ne doit plus être déplacé .

Les boîtes sont ensuite incubées à 37°C pendant 24 heures .

- **Lecture des résultats**

Après incubation, mesurer précisément le diamètre des zones d'inhibition à l'aide d'un pied à coulisse métallique, sans ouvrir la boîte .



ChapitreII

Résultatsetdiscussion

II. Résultats et discussion

II.1. Rendement d'extraction

Le rendement d'extraction de *Spirulina Arthrospira platensis* a été déterminé selon l'équation on obtient :

$$\text{Rendement \%} = 10,6\%$$

L'extraction des composés de *Spirulina Arthrospira platensis* à l'aide de l'éthanol a permis d'obtenir 0,530 g d'extrait sec à partir de 5 g de poudre de spiruline. Le rendement d'extraction a ainsi été calculé à 10,6 %.

Le rendement d'extraction obtenu avec l'éthanol (10,6 %) est considéré comme satisfaisant et conforme à ce qui a été rapporté dans la littérature. L'éthanol est un solvant polaire souvent utilisé pour l'extraction de métabolites secondaires tels que les polyphénols, flavonoïdes et certaines protéines solubles. Son efficacité est due à sa capacité à pénétrer la paroi cellulaire et à solubiliser une large gamme de composés bioactifs (Dai & Mumper, 2010).

(Bhatt and Bhat 2020) ont indiqué que l'extraction des composés antioxydants de la spiruline est plus efficace avec l'éthanol à 70 % comparé à l'eau, avec des rendements variant de 9 à 13 % selon les conditions. De même, (Safaei et al., 2019) ont observé que l'éthanol donne des rendements plus élevés que les solvants aqueux seuls, ce qui corrobore notre résultat.

Il est important de noter que d'autres paramètres comme la température, le temps de macération, la taille des particules de spiruline, ainsi que la méthode d'agitation peuvent également influencer le rendement d'extraction. D'après (Mendiola et al., 2007), l'optimisation de ces facteurs permettrait d'augmenter encore l'efficacité de l'extraction.

II.2. Dosage des sucres totaux

Le dosage des sucres totaux dans l'extrait de *Spirulina platensis*, effectué selon la méthode de (Dubois et al., 1956), a donné une concentration de 0,0187 équivalent glucose/mg d'extrait, avec un écart type très faible ($\pm 0,001$), ce qui témoigne d'une bonne précision expérimentale.

Cette valeur est cohérente avec celles rapportées dans la littérature. Par exemple, une étude menée par (Tokusoglu et Ünal 2003) a montré que *Spirulina platensis* contient environ 15,5 % de glucides dans sa biomasse sèche. De plus, (Tranquille et al., 2012) ont observé que la teneur en glucides varie entre 13 % et 20 % selon les conditions de culture (lumière, nutriments, pH).

Ainsi, bien que notre résultat soit exprimé en équivalent de glucose par mg d'extrait, il reste en accord avec la richesse modérée en sucres de la spiruline, qui contient principalement des polysaccharides structuraux et de réserve.

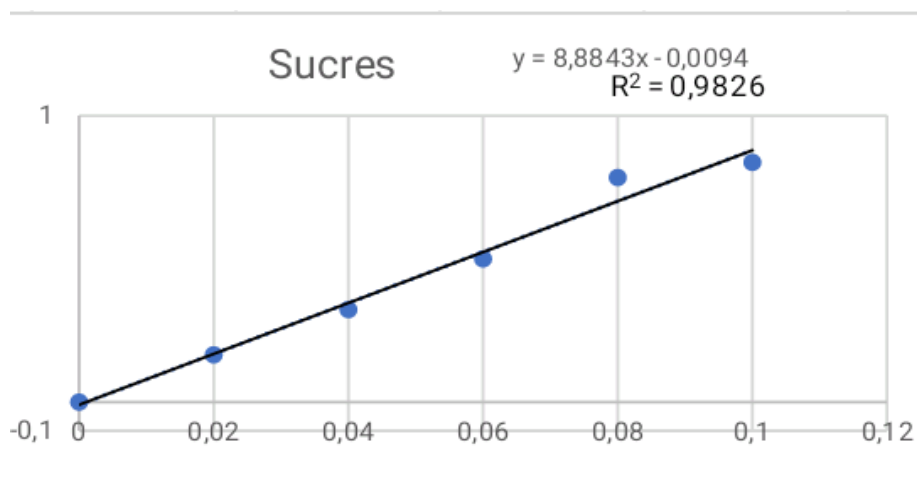


Figure 10 : Courbe d'étalonnage des sucres totaux.

II.3. Dosage des protéines

La méthode de Biuret est une méthode colorimétrique classique utilisée pour le dosage des protéines totales. Dans notre étude, la concentration moyenne obtenue à partir de l'extrait de *S. platensis*, est de 0,119 mg équivalent de BSA/mg d'extrait, avec un écart type relativement élevé ($\pm 3,075$ mg), ce qui reflète une variabilité importante entre les répétitions. Cette variabilité peut être attribuée à plusieurs facteurs, notamment : des erreurs de manipulation (pipetage, homogénéité de l'échantillon), une faible sensibilité de la méthode à de très faibles concentrations, ou encore une dilution excessive de l'échantillon.

En comparaison avec les données de la littérature, la spiruline est généralement reconnue pour sa richesse exceptionnelle en protéines. Selon (Habib et al., 2008), la spiruline peut contenir jusqu'à 60-70 % de protéines de son poids sec, ce qui est nettement supérieur au résultat obtenu dans notre

étude . Cette différence peut être expliquée par plusieurs facteurs : les conditions de culture (température, lumière, nutriments), la souche utilisée, la méthode d'extraction, ou encore l'état de conservation de l'échantillon .

Ainsi, bien que notre résultat soit inférieur aux valeurs attendues, il reste interprétable dans le contexte des limites expérimentales et peut être amélioré par l'optimisation des conditions d'analyse .

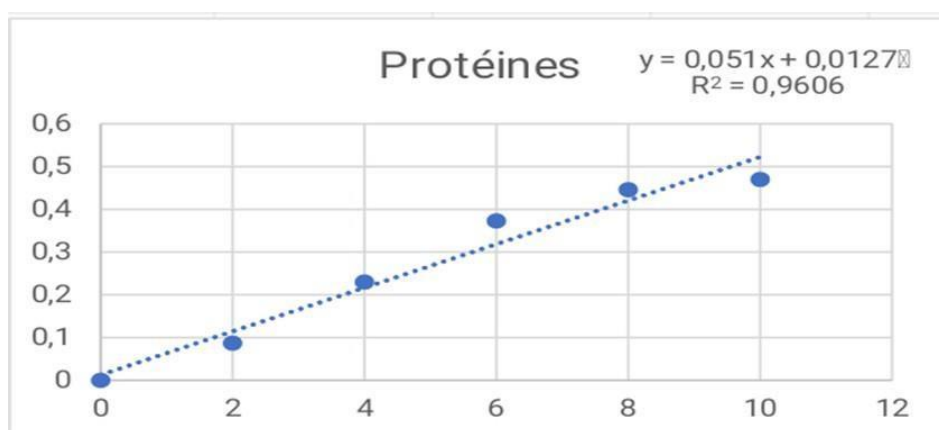


Figure 11 : la courbe d'étalonnage des protéines

II.4. Teneur en lipide

La teneur en lipides totaux de *Spirulina platensis*, déterminée par extraction avec de l'hexane à l'aide d'un appareil Soxhlet, a été estimée à 6,2 % par rapport à la matière sèche .

La spiruline est un microalgue connue pour sa richesse en protéines et en pigments, tandis que sa fraction lipidique reste quantitativement modérée . Dans cette étude, l'extraction des lipides à l'aide de l'hexane

La teneur en lipides obtenue (6,2%) est en accord avec les valeurs généralement rapportées dans la littérature, qui varient entre 4 % et 8 % selon les conditions de culture, la souche utilisée et la méthode d'extraction . Cette valeur est comparable à celle rapportée selon **Hudson et Karis (1974)**, les lipides constituent généralement entre 6 et 8 % du poids sec de la spiruline, mais cette proportion peut atteindre jusqu'à 11 % dans certaines conditions .

Des facteurs comme la température, la lumière, la phase de croissance et la teneur en nutriments du milieu de culture peuvent influencer l'accumulation de lipides chez la spiruline. Une culture en condition de stress, notamment en azote, est souvent associée à une augmentation de la teneur lipidique.

II.5. Teneur en matière sèche et teneur d'humidité

Après séchage de la spiruline à 105°C, la masse de l'échantillon est passée de 2,5 g à 2,285 g, soit une perte en eau de 0,215 g. La teneur en humidité calculée est de 8,60%, ce qui correspond à une teneur en matière sèche de 91,40 %.

$$\text{MS}(\%) = 91.4\%$$

$$\text{Humidité}(\%) = 8.60\%$$

La teneur en matière sèche obtenue est élevée, ce qui indique une faible teneur en eau dans l'échantillon après séchage. Ce résultat est cohérent avec ceux rapportés dans la littérature, où la teneur en matière sèche de *Spirulina platensis* est généralement comprise entre 90% et 93% après séchage à l'étuve (Vonshak, 1997). Une faible humidité est essentielle pour une meilleure conservation et pour l'analyse précise des composants bioactifs. En effet, les teneurs en protéines, glucides, polyphénols et autres composés sont exprimées sur la base de la matière sèche, garantissant ainsi une comparaison fiable entre différents échantillons (Becker, 2007).

II.6. Résultats des analyses quantitatives des métabolites secondaires

II.6.1. Dosage des polyphénols totaux

Le dosage des polyphénols totaux dans les extraits méthanoliques issus des résidus secs de spiruline a été réalisé par la méthode spectro-photométrique, en utilisant le réactif de Folin-Ciocalteu. L'acide gallique a servi de standard de référence pour l'établissement de la courbe d'étalonnage.

Après l'ajout du réactif de Folin-Ciocalteu, une coloration bleue est apparue, indiquant la présence de composés phénoliques dans l'extrait méthanolique. Cette coloration résulte de la réduction du réactif par les groupes hydroxyles phénoliques présents dans l'échantillon.

Les résultats ont été exprimés en μg d'équivalent acide gallique par milligramme d'extrait sec ($\mu\text{g EAG/mg ES}$), en se basant sur l'équation de la droite de régression obtenue à partir de la courbe d'étalonnage de l'acide gallique.

Le dosage des polyphénols totaux dans l'extrait de *Spirulina Arthrospira platensis* a révélé une teneur moyenne de $220,18 \mu\text{g/mg}$, équivalente à $220,18 \text{ mg}$ d'équivalent acide gallique (EAG) par gramme de matière sèche. Cette concentration indique une richesse notable en composés phénoliques, qui jouent un rôle essentiel dans l'activité antioxydante de la spiruline.

Nos résultats montrent que l'extrait hydrométhanolique de spiruline contient une teneur importante des polyphénols avec une valeur moyenne de $(220,18 \pm 4,49)$. Calculée à partir de la droite de régression de l'acide gallique, donc nos résultats sont supérieurs au résultat trouvé par (Boussahelet *al*., 2013) qui ont obtenu $(33,65 \pm 2,5 \text{ mg EAG/g d'extrait})$. La raison de cette différence de composés phénoliques est due aux conditions climatiques dans lesquelles a été cultivée notre souche de spiruline.

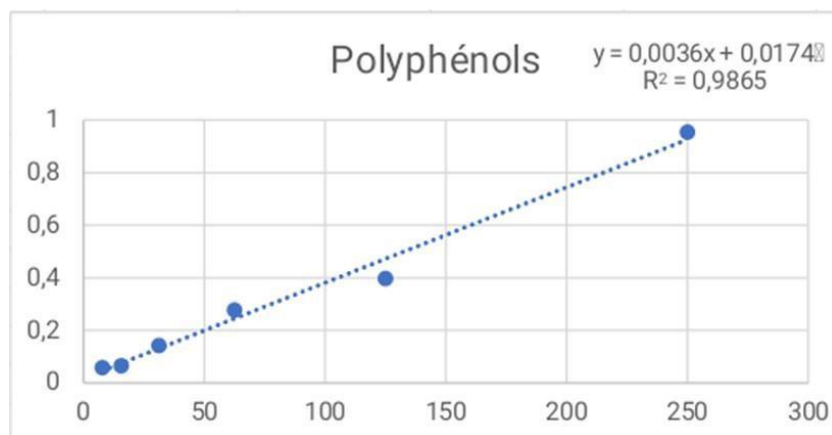


Figure 12: la courbe d'étalonnage des polyphénols.

II.6.2. Dosage des flavonoïdes

La teneur en flavonoïdes a été déterminée par la méthode colorimétrique. La quercétine a été utilisée comme standard pour l'établissement de la courbe d'étalonnage, réalisée à partir de différentes concentrations.

Les résultats sont exprimés en milligrammes d'équivalent quercétine (mgEQ/g) de matière sèche. La courbe d'étalonnage obtenue a permis de calculer la concentration en flavonoïdes dans les extraits analysés.

Le dosage des flavonoïdes dans l'extrait de *Spirulina Arthrospira platensis* a révélé une teneur moyenne de 37,814 µg/mg, équivalente à 37,814 mg d'équivalent la quercitrine / mg d'extrait.

La teneur en flavonoïdes observée dans cette étude (37,814 ± 22,258 mg EQ/g). Calculée à partir de la droite de régression de l'acide gallique donc notre résultat est supérieur au résultat trouvé par (Bouba *et al*., 2010). Cette différence peut s'expliquer par plusieurs facteurs peuvent influencer cette variabilité :

- Les conditions de culture (température, lumière, pH du milieu, nutriments)
- La souche de spiruline utilisée
- La méthode d'extraction et de dosage
- La conservation et la transformation post-récolte

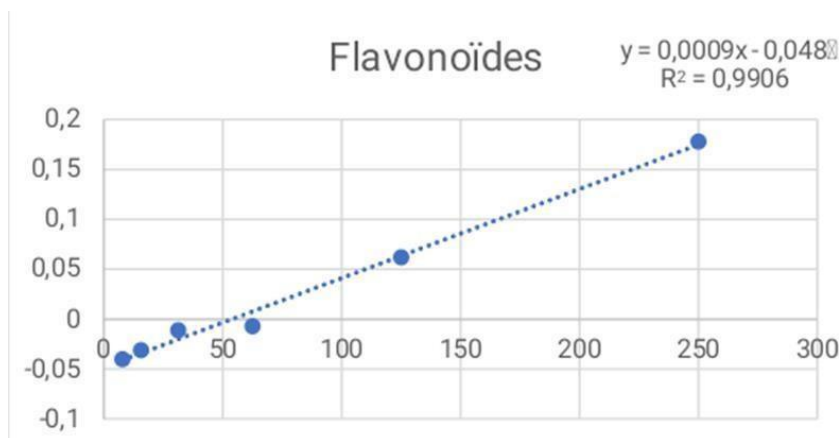
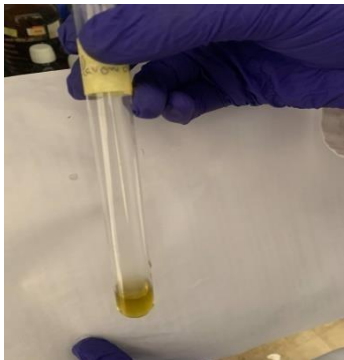


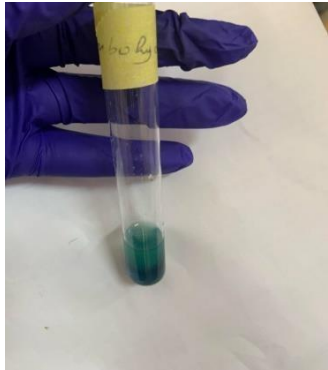
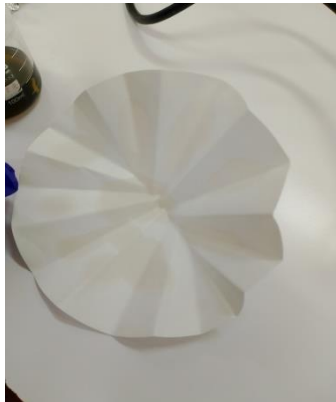
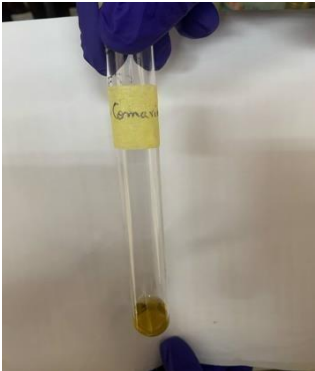
Figure 13: la courbe d'étalonnage des flavonoïdes.

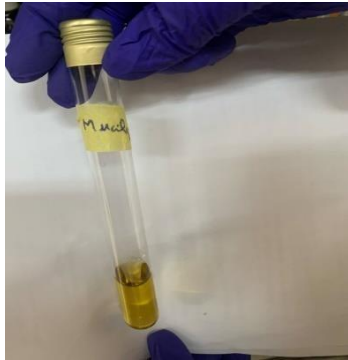
II.7. Analyse phytochimique qualitative

L'étude phytochimique a été permise de mettre en évidence divers métabolites secondaires. Le **Tableau (07)** regroupe les résultats des tests phytochimiques réalisés sur la spiruline *Arthrospira platensis*.

Tableau 09: Résultats du screening phytochimique de la spiruline *Arthrospira platensis*

Recherche de	Résultat+-	Résultat photo
Les composés phénoliques	+	
Les flavonoïdes	+	
Les saponosides	+	

Les glucides	+	
Les lipides	+	
Les stéroles et les triterpènes	+	
Les coumarines	-	

Mucilage	-	
Lesterpenoides	+	

Les tests phytochimiques ont été réalisés sur une biomasse séchée de spiruline . En utilisant des solvants de polarité différente et des réactifs spécifiques de révélation .

Le screening phytochimique a révélé la présence de métabolites secondaires dans la spiruline . L'identification de ces composés repose sur des tests de solubilité des constituants ainsi que sur des réactions de précipitation et de turbidité . Les résultats obtenus mettent en évidence une richesse moléculaire notable en ce qui concerne les métabolites secondaires présents dans la plante étudiée .

Les résultats du screening phytochimique révèlent une diversité moléculaire significative dans la microalgue étudiée, notamment en ce qui concerne les métabolites secondaires . Les tests phytochimiques réalisés sur la spiruline, comme indiqué dans le **tableau (07)**, confirment la présence de flavonoïdes, de saponines et de phénols dans les spirulines L'étude menée par Abdelaziz en 2017 sur la détection des métabolites secondaires de la spiruline a confirmé la présence de saponines, d'alkaloïdes et de flavonoïdes et les polyphénols . Ainsi, la spiruline se distingue par sa richesse en flavonoïdes, phénols et saponines, des composés ayant un rôle essentiel

dans la préservation des aliments d'origine végétale contre l'oxydation. Ces substances sont reconnues pour leurs propriétés antioxydantes et leur effet anti-radicalaire, (Makhloufi 2010).

II.7. Les activités biologiques

II.7.1. L'activité antioxydant

L'activité antioxydante globale a été évaluée en utilisant l'acide ascorbique comme référence, et les résultats obtenus sont illustrés à la Figure 10.

➤ Test d'inhibition des radicaux libres DPPH

Le DPPH est un radical libre stable absorbant à 517 nm, couramment utilisé pour mesurer l'activité antioxydante des composés tels que les polyphénols, flavonoïdes et tanins, extraits par sonication et congélation. Dans ce test, l'acide ascorbique sert de référence standard. La concentration inhibitrice à 50% (IC_{50}) de l'extrait de spiruline est déterminée à partir de l'équation de régression de la courbe d'étalonnage, et exprimée en $\mu\text{g/ml}$. Les résultats sont présentés sous forme graphique.

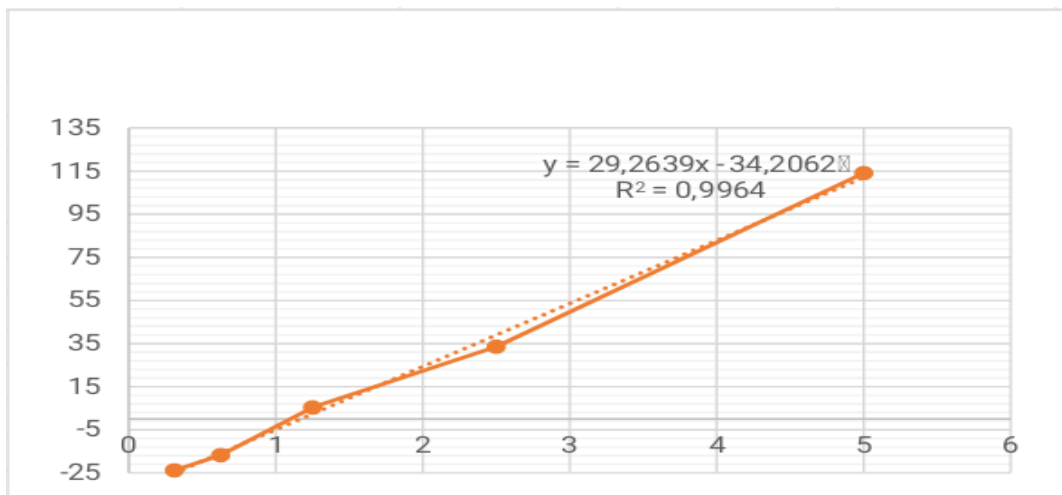


Figure 14: Courbe d'étalonnage du test DPPH.

$IC_{50} = 2,87 \text{ mg}$

IC_{50} d'acide ascorbique = $0,124 \text{ mg}$

Les résultats ont permis de calculer la concentration inhibitrice 50% (IC_{50}), l' IC_{50} obtenue pour l'extrait de spiruline est de 2,87 mg/ml, tandis que celle de l'acide ascorbique, utilisé comme standard, est de 0,124 mg/ml. L' IC_{50} élevée de l'extrait de spiruline (2,87 mg/ml) par rapport à celle de l'acide ascorbique (0,124 mg/ml) indique une capacité antioxydante plus faible. Plus l' IC_{50} est faible, plus l'activité antioxydante est élevée. Ces résultats suggèrent que l'extrait hydro-méthanolique de spiruline possède une activité antioxydante modérée, nécessitant une concentration bien plus importante que celle de la vitamine C pour obtenir un effet similaire. (Safaei, M et al., 2020)

Cette activité peut être attribuée à la présence de composés antioxydants comme les phénols, flavonoïdes, et pigments (notamment la phycocyanine), connus pour leur pouvoir de piéger des radicaux libres. Toutefois, leur efficacité dépend fortement de la concentration et de la méthode d'extraction utilisée. Des études antérieures confirment ces observations: Mishra et al. (2006) ont également montré que l'activité antioxydante de *Spirulina platensis* est présente mais inférieure à celle de standards antioxydants puissants comme l'acide ascorbique. Néanmoins, cette activité reste intéressante dans une optique d'utilisation comme complément alimentaire naturel.

II.7.2. L'activité anti-bactérienne

Pour évaluer la sensibilité de nos souches bactériennes (*E. coli*, *Staphylococcus aureus* et *Pseudomonas aeruginosa*) à divers antibiotiques, qu'ils soient supposés ou déjà reconnus comme efficaces, un test d'antibiogramme a été réalisé. Ce test a pour objectif de déterminer avec précision le spectre d'activité antibactérienne des principales familles d'antibiotiques sélectionnées contre ces germes. L'antibiotique présentant la plus forte activité sera ensuite utilisé comme témoin positif lors de l'évaluation de l'activité antibactérienne de la spiruline.

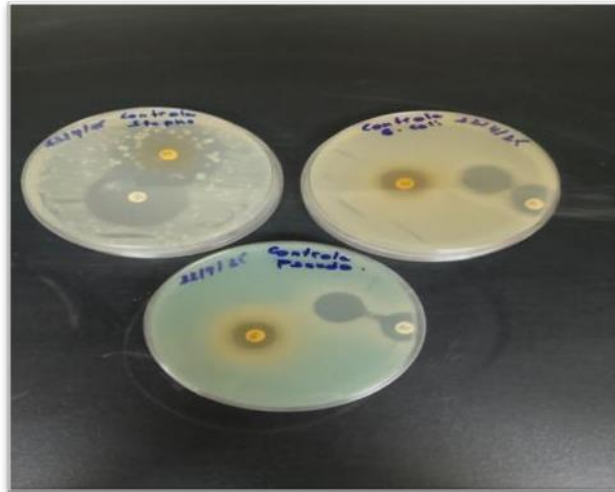
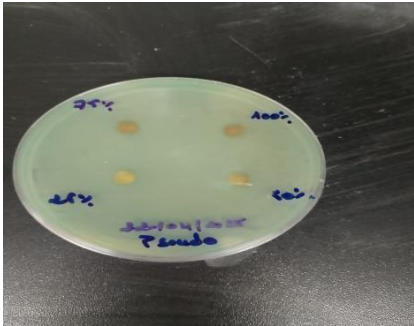


Figure 15: Zones d'inhibition observées autour des disques d'antibiotiques Utilisés comme contrôles positifs contre les souches bactériennes testés

Tableau 11: Images des boîtes de pétri montrant l'absence de zones d'inhibition autour des disques contenant l'extrait de spiruline *Arthrospira platensis* contre différentes souches bactériennes .

Souches bactériennes				
concentrations en %	25%	50%	75%	100%
Zone d'inhibition	0mm	0mm	0mm	0mm
<i>Escherichia coli</i>				
<i>Staphylococcus aureus</i>				
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>				

L'évaluation de l'activité antibactérienne de l'extrait méthanolique de *Spirulina platensis* a été réalisée selon la méthode de diffusion sur gélose (disc diffusion), en testant trois souches bactériennes pathogènes :

- *Escherichia coli* (Gram-),
- *Staphylococcus aureus* (Gram+),
- *Pseudomonas aeruginosa* (Gram-) .

Ont révélé l'absence totale de zones d'inhibition autour des disques imprégnés par l'extrait, quelle que soit la souche testée, indiquant une absence d'effet antibactérien dans les conditions expérimentales utilisées . En revanche, les antibiotiques de référence (gentamicine, céfoxitine et rifampicine) ont montré des zones d'inhibition nettes, confirmant la sensibilité des souches utilisées . En revanche, l'extrait éthanolique de *Spirulina Arthrospiraplatensis* n'a montré aucune activité antibactérienne, aucune zone d'inhibition n'ayant été observée sur les milieux ensemencés tel qu'illustré dans le **Tableau 11**

L'extrait éthanolique de *Spirulina platensis* n'a montré aucune activité antibactérienne mesurable contre *E. coli*, *S. aureus* et *P. aeruginosa* . Ce résultat pourrait être expliqué par plusieurs facteurs :

- Nature du solvant
- Origine et conditions de culture de la spiruline
- Résistance des souches

Plusieurs études ont rapporté une activité antibactérienne significative de la spiruline, **Ghaeni**

& Roomiani (2016) ont indiqué que les extraits méthanoliques de spiruline peuvent avoir une action modérée, mais que cette efficacité dépend fortement de la concentration et du mode d'extraction .

Il est également possible que les souches bactériennes testées présentent une résistance naturelle vis-à-vis des substances contenues dans la spiruline . Ces résultats contrastent avec certaines études ayant rapporté une activité antibactérienne positive des extraits de *Spirulina platensis*, en particulier lorsqu'ils sont obtenus par extraction à l'éthanol ou au méthanol, et à des concentrations plus élevées (**Ozdemir et al ., 2008**)



Conclusion

Conclusions

Conclusion

La spiruline est une cyanobactérie reconnue pour sa richesse exceptionnelle en protéines complètes, vitamines, minéraux et autres nutriments essentiels . Grâce à ses propriétés anti-inflammatoires et antioxydantes, elle suscite un intérêt croissant de la part des scientifiques en raison de sa grande valeur nutritionnelle .

Cette composition confère à la spiruline un statut de grande importance à l'échelle mondiale, en raison de sa richesse nutritionnelle . Elle représente une solution prometteuse dans la lutte contre la malnutrition et contribue également à l'amélioration des produits énergétiques .

À l'issue de ce travail, nous avons mené une étude approfondie sur la microalgue *Spirulina Arthrospira platensis*, en mettant en évidence sa richesse en composés bioactifs ainsi que ses propriétés nutritionnelles . L'objectif principal de notre recherche était de valoriser cette cyanobactérie en tant que source naturelle de nutriments essentiels et de molécules d'intérêt, à travers une analyse des teneurs obtenues dans des échantillons cultivés localement dans la région de Biskra .

Les analyses réalisées ont permis de quantifier des teneurs notables en protéines, sucres, polyphénols et flavonoïdes, confirmant ainsi le profil nutritionnel riche de la spiruline, tel que rapporté dans la littérature . L'évaluation de l'activité antioxydante a mis en évidence une capacité significative de piégeage des radicaux libres, traduisant la présence de composés antioxydants naturels . En revanche, les tests d'activité antibactérienne n'ont révélé aucune effet inhibiteur sur les souches bactériennes testées, ce qui suggère l'absence d'une activité antimicrobienne de l'extrait de spiruline dans les conditions expérimentales appliquées .

Ainsi, nos résultats soutiennent la valorisation de la spiruline cultivée à Biskra principalement pour ses qualités nutritionnelles et son activité antioxydante . Des recherches complémentaires seraient nécessaires pour explorer d'autres conditions d'extraction, de culture ou de formulation, susceptibles de révéler un potentiel biologique plus large .



Les références bibliographiques

Les références bibliographiques

Les références bibliographiques

A

- Abert Vian, M. (2021). Spiruline-Culture, production et applications. Techniques de l'Ingénieur.
- Adel, A. T., & Saleh, M. A. (2014). Spirulina platensis production using date palm substances and low cost media in the climatic conditions of Saudi Arabia. Advances in Environmental Biology, 8(7), 2350–2356.
- Afaa, Association française pour l'algologie appliquée. (1982). Actes du premier symposium sur la Spiruline platensis (Gom.) Geitler de l'AFAA.
- Al-Ghanayem, A. A. (2017). Antimicrobial activity of Spirulina platensis extracts against certain pathogenic bacteria and fungi. Advances in Bioresearch, 8(6), 96–101. <https://doi.org/10.15515/abr.0976-4585.8.6.96101>
- Ali, S. K., & Saleh, A. M. (2012). Spiruline – Un aperçu.
- ANSES. (2017). Risques liés à la consommation de compléments alimentaires contenant de la spiruline (Avis de l'ANSES no. 2014-SA-0096). Maisons-Alfort, France : ANSES.
- Antenna Technologies.
- Avila-Leon, I., Matsudo, M. C., Sato, S., & de Carvalho, J. C. M. (2012). Arthrospira platensis biomass with high protein content cultivated in continuous process using urea as nitrogen source.
- Ahounou, M. N. (2018). La SPIRULINE : un complément alimentaire en conseil à l'officine. Enquête d'utilisation. (Doctoral dissertation, Université de Rouen).

B

- Banks, J. (2007). Étude de la spiruline au Palacret : Étudier la faisabilité de la mise en place d'une filière spiruline sur le site du Palacret, dans les Côtes d'Armor. Manuel, pp. 10–11.
- Belay, A. (2002). Mass culture of spirulina outdoors – The Earthrise farm experience. In A. Vonshak (Ed.), Spirulina platensis (Arthrospira): Physiology, cell-biology and biotechnology (pp. 252). London, UK: Taylor & Francis.
- Belay, A. (2007). Spirulina (Arthrospira): Production and quality assurance. CRC Press.
- Benahmed Djilali, A. (2021). Analyse des aptitudes technologiques de poudres de dattes (Phoenix dactylifera L.) améliorées par la spiruline : Étude des propriétés rhéologiques,

Les références bibliographiques

nutritionnelles et antibactériennes [Thèse de doctorat, Université M'Hamed Bougara de Boumerdès, Algérie] .

Les références bibliographiques

- Benariba, N., Djaziri, R., Bellakhdar, W., Belkacem, N., Kadiata, M., & Malaisse, F. (2013). Phytochemical screening and free radical scavenging activity of *Citrullus colocynthis* seeds extracts. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*, 3(1), 35–40.
- Békro, Y. A., Békro, J. A. M., Boua, B. B., Tra, B. F. H., & Ehilé, E. E. (2007). Études ethnobotanique et screening phytochimique de *Caesalpinia benthamiana* (Baill.) Herend. et Zarucchi (Caesalpi).
- Bouba, A., Njintang, Y. N., Scher, J., & Mbofung, C. M. F. (2010). Phenolic compounds and radical scavenging potential of twenty Cameroonian spices. In *African Indigenous Vegetables in Urban Agriculture* (pp. 179–190). CABI. <https://doi.org/10.1079/9781845936495.0179>
- Boussahel, S., Dahamna, S., Ruberto, G., Siracusa, L., & Harzallah, D. (2013). Phytochemical screening and antioxidant activity of some Algerian medicinal plants. *Pharmacognosy Communications*, 3(1), 46–49.
- Benhammou, N., Atik Bekkara, F., & Kadifkova, P. (2007). Antiradical capacity of the phenolic compounds of *Pistacia lentiscus* L. and *Pistacia atlantica* Desf. *Advances in Food Sciences*, 29(3), 155–161.
- Black, M. M. (2003). The evidence linking zinc deficiency with children's cognitive and motor functioning. *Journal of Nutrition*, 133(5), 1473–1476.
- Bortolini, D. G., Maciel, G. M., Fernandes, I. A. A., Pedro, A. C., Rubio, F. T. V., Branco, I. G., & Haminiuk, C. W. I. (2022). Propriétés fonctionnelles des composés bioactifs de *Spirulina* spp.: État actuel et tendances futures. *Food Chemistry: Molecular Sciences*, 5, 100134. <https://doi.org/10.1016/j.fochms.2022.100134>
- Boudaoud, S. (2016). L'incorporation de la spiruline sur les qualités nutritionnelles, organoleptiques et technologiques du couscous artisanal [Mémoire de Master, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen].
- Bougandoura, N. (2010). Pouvoir antioxydant et antimicrobien des extraits d'espèces végétales *Satureja calamintha* spp. *nepeta* (nabta) et *Ajuga iva* L. (chendgoura) de l'Ouest d'Algérie [Mémoire de Magister, Université de Tlemcen].
- Bougaran, G., & Saint-Jean, B. (2014). Microalgues: de petits végétaux aux grandes promesses ! *Biofutur*, 360, 28–31. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00252/36321/>
- Br. R. (2020). Une revue sur la spiruline (*Arthrospira platensis*) pour son effet antioxydant et neuroprotecteur.
- Bangun, R., Lahuddin, A. H., & Ranti, G. (2015). The influence of culture, job satisfaction and motivation on the performance.

Les références bibliographiques

- Benahmed Djilali, A . (2012) .** Analyse des aptitudes technologiques de poudres de dattes (*Phoenix dactylifera* L .) améliorées par la spiruline : Étude des propriétés rhéologiques, nutritionnelles et antibactériennes (Thèse de doctorat) . Université M'Hamed Bougara, Boumerdes, Algérie .
- Becker, W . (2007) .** Microalgae in human and animal nutrition . In A . Richmond (Ed .), *Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology* (pp . 312–351) . Blackwell Publishing Ltd . [https://doi .org/10 .1002/9780470995280 .ch15](https://doi.org/10.1002/9780470995280.ch15)
- Brand-Williams, W ., Cuvelier, M . E ., & Berset, C . (1995) .** Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity . *LWT - Food Science and Technology*, 28(1), 25–30 .
- Br . R . (2020) .** Une revue sur la spiruline (*Arthrospira platensis*) pour son effet antioxydant et neuroprotecteur . [effect . *IP International Journal of Comprehensive and Advanced Pharmacology*, 4(4), 116–119 . [https://doi .org/10 .18231/j .ijcaap .2019 .024](https://doi.org/10.18231/j.ijcaap.2019.024)] .
- Bhatt, P ., & Bhat, R . (2020) .** Comparative study on the extraction of bioactive compounds from *Spirulina platensis* using various solvents and evaluation of antioxidant potential . *Journal of Applied Phycology*, 32(3), 2077–2085 . [https://doi .org/10 .1007/s10811-019-01938-5](https://doi.org/10.1007/s10811-019-01938-5)

C

- **Capelli, B ., Talbott, S ., & Ding, L . (2019) .** Astaxanthin sources: Suitability for human health and nutrition . *Functional Foods in Health and Disease*, 9(6), 430–445 . [https://doi .org/10 .31989/ffhd .v9i6 .584](https://doi.org/10.31989/ffhd.v9i6.584)
- **Caroppo, C ., & Pagliara, P . (2022) .** Microalgae: A promising future . *Microorganisms*, 10(8), 1488 . [https://doi .org/10 .3390/microorganisms10081488](https://doi.org/10.3390/microorganisms10081488)
- **Casal, A . (2019) .** L'aliment idéal le plus complet de demain . *Spiruline France* . [https://www .spirulinefrance .fr/spiruline](https://www.spirulinefrance.fr/spiruline)
- **Casal, A . (2012) .** Spiruline : sa composition nutritionnelle . *Spiruline France* . [https://www .spirulinefrance .fr/composition-spiruline](https://www.spirulinefrance.fr/composition-spiruline)
- **Chaiklahan, R ., Chirasuwan, N ., Srinorasing, T ., Attasat, S ., Nopharatana, A ., & Bunnag, B . (2022) .** Enhanced biomass and phycocyanin production of *Arthrospira (Spirulina) platensis* by a cultivation management strategy: Light intensity and cell concentration . *Bioresource Technology*, 343, 126077 . [https://doi .org/10 .1016/j .biortech .2021 .126077](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126077)
- **Charpy, L ., Langlade, M . J ., & Vicente, N . (2004) .** Les cyanobactéries pour la santé, la science et le développement

Les références bibliographiques

.In Actes du Colloque international sur les cyanobactéries pour la santé, la science et le développement (pp . 1-6) . Île des Embiez, France . https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/doc34-08/010035381.pdf

Les références bibliographiques

- Charpy, L., Langlade, M. J., & Alliod, R. (2008). La spiruline peut-elle être un atout pour la santé et le développement en Afrique? Institut de Recherche pour le Développement (IRD). <https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi%3A010049963>
- Chen, W., Xu, J., Yu, Q., Yuan, Z., Kong, X., Sun, Y., Wang, Z., Zhuang, X., Zhang, Y., & Guo, Y. (2020). Structural information reveals effective methods for cell wall dissociation of *Spirulina platensis* for multi-output recovery. *Bioresource Technology*, 300, 122628. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122628>
- Ciferri, O. (1983). *Spirulina*, the edible microorganism. *Microbiological Reviews*, 47(4), 551–578.
- Clément, G. (1975). Production et constituants caractéristiques des algues *Spirulina platensis* et *Spirulina maxima*. *Annales de la Nutrition et de l'Alimentation*, 29(6), 477–488.
- Colorimetric Method for Determination of Sugars and Related Substances: Dubois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A., & Smith, F. (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry*, 28(3), 350–356. <https://doi.org/10.1021/ac60111a017>
- Contrôle: Éclairage et Estimation de la Biomasse: Lemoine, Y. (2017). Optimisation de la culture de la spiruline en milieu contrôlé : Éclairage et estimation de la biomasse (Thèse de doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier). <https://theses.fr/2017TOU30378>
- Cruchot, H. (2008). La spiruline: bilan et perspectives (Thèse de doctorat en pharmacie, 13 mai 2008), p. 60.

D

- Danesi, E. D. G., Rangel-Yagui, C. O., de Carvalho, J. C. M., & Sato, S. (2004). Effect of reducing the light intensity on the growth and production of chlorophyll by *Spirulina platensis*. *Biomass and Bioenergy*, 26(4), 329–335. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(03\)00244-2](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(03)00244-2)
- Dansou, D. K. (2002). Développement de la culture de la spiruline (*Spirulina platensis*) et valorisation de celle-ci au Burkina Faso (Diplôme d'études supérieures spécialisées). Université de Ouagadougou, Burkina Faso.
- Demisu, D. G., & Benti, B. D. (2018). Application of *Arthrospira platensis* as an alternative source of food, maintaining nutritional security and awareness creation; thereby reducing problems of malnutrition in the society. *World News of Natural Sciences*, 18, 1–12. <http://www.worldnewsnaturalsciences.com/>

Les références bibliographiques

-Dai, J ., & Mumper, R . J . (2010) . Plant phenolics: Extraction, analysis and their antioxidant and anticancer properties . *Molecules*, 15(10), 7313–7352 . <https://doi.org/10.3390/molecules15107313>

- Derdouri, D ., Karoui, I ., & Derdouri, Y . (2022) . Étude comparative des valeurs nutritionnelles de la spiruline cultivée dans deux régions différentes en Algérie (Mémoire de Master) . Université d'El-Oued .

- Dubois, M ., Gilles, K . A ., Hamilton, J . K ., Rebers, P . A ., & Smith, F . (1956) . Colorimetric method for determination of sugars and related substances . *Analytical Chemistry*, 28(3), 350–356 . <https://doi.org/10.1021/ac60111a017>

F

- Fagiri, Y . M . A ., Salleh, A ., & El-Nagerabi, S . A . F . (2013) . Influence of chemical and environmental factors on the growth performance of *Spirulina platensis* strain SZ100 . *Journal of Algal Biomass Utilization*, 4(2), 7–15 .

- Falquet, J ., & Hurni, J .-P . (2006) . Spiruline: aspects nutritionnels . Antenna Technologies .

- Farrar, W .-V . (1996) . A glimpse of Aztec food technology . *Nature*, 384(6609), 341–342 . <https://doi.org/10.1038/384341a0>

- Fox, R . D . (1999) . Spiruline: Technique pratique et promesse . Aix-en-Provence, France: Edisud, p . 246 .

- Furmaniak, M . A ., Misztak, A . E ., Franczuk, M . D ., Wilmotte, A ., Waleron, M ., & Waleron, K . F . (2017) . Edible cyanobacterial genus *Arthrospira*: Actual state of the art in cultivation methods, genetics, and application in medicine . *Frontiers in Microbiology*, 8, 2541 . <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02541>

G

- Galaret, A . (n .d .) . Mon approche écologique . Spiruline d'Olt . <https://spirulinedolt.fr/approche-ecologique/>

- Galasso, C ., Gentile, A ., Orefice, I ., Ianora, A ., Bruno, A ., Noonan, D . M ., Sansone, C ., Albini, A ., & Brunet, C . (2019) . Microalgal derivatives as potential nutraceutical and food supplements for human health: A focus on cancer prevention and interception . *Nutrients*, 11(5), 1226 . <https://doi.org/10.3390/nu11051226>

- Ghaeni, M ., & Roomiani, L . (2016) . Review for application and medicine effects of *Spirulina platensis* microalgae . *Journal of Advanced Agricultural Technologies*, 3(2), 114–117 . <https://doi.org/10.18178/joaat.3.2.114-117>

Les références bibliographiques

- Gibson, R . S . (2005) . Zinc: The missing link in combatting micronutrient malnutrition in developing countries . Proceedings of the Nutrition Society, 65(1), 51–60 . <https://doi.org/10.1079/PNS2005476>
- Girardin-Andréani, C . (2005) . Spiruline : système sanguin, système immunitaire et cancer . Phytothérapie, 4, 158–161 . <https://doi.org/10.1007/s10298-005-0143-3>
- Gornall, A . G ., Bardawill, C . J ., & David, M . M . (1949) . Determination of serum proteins by means of the biuret reaction . Journal of Biological Chemistry, 177(2), 751–766 .
- Goulambasse, T . R . (2018) . La spiruline : Activités thérapeutiques et son intérêt dans la lutte contre la malnutrition à Madagascar (Thèse de doctorat en pharmacie, Université de Lille) .

H

- Habib, M . A . B ., Parvin, M ., Huntington, T . C ., & Hasan, M . R . (2008) . A review on culture, production and use of spirulina as food for humans and feeds for domestic animals and fish (FAO Fisheries and Aquaculture Circular No . 1034) . FAO .
- Hajati, H ., & Zaghari, M . (2019) . Spirulina platensis in poultry nutrition . Newcastle upon Tyne .
- Hayal, H . T . (1995) . A natural sulfated polysaccharide claims herpes simplex virus and anti- human immunodeficiency virus activities . AIDS Research and Human Retroviruses, 12, 1463– 1471 .
- Huili W ., Xiaokai Z ., Meili L ., Dahlgren R . A ., Wei C ., Jaiopeng Z ., et al . (2013) . Proteomic Analysis and qRT-PCR Verification of Temperature Response to *Arthrospira* (Spirulina) *platensis* . PLoS ONE, 8(12), e83485 . <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0083485>
- Harriman, G . R ., Smith, P . D ., Horne, M . K ., Fox, C . H ., Koenig, S ., Lack, E . E ., & Lane, H . C . (1989) . Vitamin B12 malabsorption in patients with acquired immunodeficiency syndrome . Archives of Internal Medicine, 149(9), 2039–2041 .
- Hayashi, T ., Hayashi, K ., Maeda, M ., & Kojima, I . (1996) . Le calcium spirulan, un inhibiteur de la réplication des virus enveloppés, issu d'une algue bleu-vert *Spirulina platensis* . Journal of Natural Products, 59(1), 83–87 . <https://doi.org/10.1021/np960017o>
- Hayashi, K ., Hayashi, T ., & Kojima, I . (1996) . A natural sulfated polysaccharide, calcium spirulan, isolated from *Spirulina platensis*: In vitro and ex vivo evaluation of anti-herpes simplex virus and anti-human immunodeficiency virus activities . AIDS Research and Human Retroviruses, 12(15), 1463–1471 .

Les références bibliographiques

-Hernández-Corona, A., Nieves, I., et al. (2002). Antiviral activity of *Spirulina maxima* against herpes simplex virus type 2. *Antiviral Research*, 56(3), 279–285.

Les références bibliographiques

-Hudson, B. J. F., Karis, I. G. (1974) . The lipids of the alga spirulina . Journal of the Science of Food and Agriculture, 25, 759-763 .

I

-Iltis, A. (1968) . Tolérance de la salinité de *Spirulina platensis* (Gom.) Geitl (Cyanophyta) dans les mares natronées du Kanem (Tchad) . Cahiers ORSTOM, Série Hydrobiologie, 2 . In A. Vonshak (Éd.), *Spirulina platensis (Arthrospira) : Physiology, Cell Biology and Biotechnology* (pp 100– 120)

-Ismail, M. F., Ali, D. A., Fernando, A., et al. (2009) . Chemoprevention of rat liver toxicity and carcinogenesis by *Spirulina* . International Journal of Biological Sciences, 5(5), 377–387 .

-Indhumathi, D., & Ramya, M. (2020) . Application of *Arthrospira platensis* (spirulina) as a biofertilizer for sustainable agriculture . International Journal of Botany Studies, 5(6), 204–207 . <https://www.botanyjournals.com/archives/2020/vol5issue6/PartD/5-6-27-262.pdf>

J

-Jordan, J. P. (1999) . Cultivez votre spiruline: manuel de culture artisanal . Publication Antenna Technologies .

- Jourdan, J. P. (2006) . Manuel de culture artisanale pour la production de spiruline (Diplôme M. I. T., Industrie chimique) . Paris, France .

- Jung, F., Krüger-Genge, A., Franke, R. P., & Hufert, F. (2021) . Morphology and growth of *Arthrospira platensis* during cultivation in a flat panel photobioreactor . Life, 11(6), 536 . <https://doi.org/10.3390/life11060536>

K

- Karemore, A., Yuan, Y., Porubsky, W., & Chance, R. (2020) . Biomass and pigment production for *Arthrospira platensis* via semi-continuous cultivation in photobioreactors: Temperature effects . Biotechnology and Bioengineering, 117(10), 3081–3093 .

- Karumi, Y., Onyeyili, P. A., & Ogugbuaja, V. O. (2004) . Identification of active principles of *M. balsamina* (Balsam Apple) leaf extract . J Med Sci, 4(3), 179-182 .

- Kaushik, P., & Chauhan, A. (2008) . In vitro antibacterial activity of laboratory grown culture of *Spirulina platensis* . Indian Journal of Microbiology, 48, 348–352 .

- Khanra, S., Mondal, M., Halder, G., Tiwari, O. N., Gayen, K., & Bhowmick, T. K. (2018) . Downstream processing of microalgae for pigments, protein and carbohydrate in industrial application: A review . Food and Bioproducts Processing, 110, 60–84 .

L

Les références bibliographiques

- Lahoucine, H. A. (2019). Étude de l'impact de l'incorporation de la Spiruline sur la qualité organoleptique et physicochimique de la mayonnaise (p. 9).
- Lecointre, R. (2017). Optimisation de la production de spiruline dans une ferme à Madagascar afin de lutter contre la malnutrition infantile (Mémoire d'ingénieur). Oniris, École Nationale Vétérinaire, Agroalimentaire et de l'Alimentation, Nantes Atlantique, p. 5.
- Lemkadem, I. (2015). Valorisation de la spiruline (microalgue) par séchage solaire.
- Liestianty, D., Rodianawati, I., Arfah, R. A., Assa, A., Patimah, Sundari, & Muliadi. (2019). Analyse nutritionnelle de Spirulina sp. pour promouvoir comme candidat superaliment. Actes de la série de conférences IOP : Science et ingénierie des matériaux, Semarang, Indonésie, 7–8 septembre, p. 012031.
- Lin, J. H., Lee, D. J., & Chang, J. S. (2015). Lutein production from biomass: Marigold flowers versus microalgae. Bioresource Technology, 184, 421–428.
- Luque de Castro, M. D., & García-Ayuso, L. E. (1998). Soxhlet extraction of solid materials: an outdated technique with a promising innovative future. Analytica Chimica Acta, 369(1-2), 1–10. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(98\)00233-5](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(98)00233-5)
- M**
- Mabeau, S., & Fleurence, J. (1990). Seaweed in food products: Biochemical and nutritional aspects. Trends in Food Science & Technology, 1(4), 103–107. [https://doi.org/10.1016/0924-2244\(90\)90070-M](https://doi.org/10.1016/0924-2244(90)90070-M).
- Macedo, M. F., Miller, A. Z., Dionísio, A., & Saiz-Jimenez, C. (2009). Biodiversity of cyanobacteria and green algae on monuments in the Mediterranean Basin: An overview. Microbiology (Reading, England), 155(11), 3476–3490. <https://doi.org/10.1099/mic.0.032508-0>
- Magermans, P., Dengis, C., Detienne, X., Graindorge, C., & Deliege, J. F. (2019). Training of business and civil society actors to the culture of Spirulina in Haiti. Geo-Eco-Trop, 43(3), 453–460.
- Mojisola, A. (2020). La spiruline africaine: origine (Tchad), bienfait et usage. La Nouvelle Tribune.
- Makhloufi, A. (2010). Étude des activités antimicrobienne et antioxydante de deux plantes médicinales poussant à l'état spontané dans la région de Béchar (*Matricaria pubescens* (Desf.) et *Rosmarinus officinalis* L.) et leur impact sur la conservation des dattes et du beurre cru (Thèse de doctorat d'État, Université Aboubakr Belkaïd, Tlemcen, Algérie).

Les références bibliographiques

- Miranda, M . S ., Cintra, R . G ., Barros, S . B . M ., & Mancini-Filho, J . (1998) . Antioxidant activity of the microalga *Spirulina maxima* . Brazilian Journal of Medical and Biological Research, 31(10), 1075–1079 . <https://doi.org/10.1590/S0100-879X199800080000>
- Markou, G . (2012) . Altération de la composition de la biomasse d' *Arthrospira* (*Spirulina*) *platensis* sous diverses quantités de phosphore limité . Bioresource Technology, 116, 533–535 . <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.04.022>
- Mendiola, J . A ., Jaime, L ., Santoyo, S ., Reglero, G ., Cifuentes, A ., Ibañez, E ., & Señoráns, F . J . (2007) . Extraction of functional ingredients from *Spirulina platensis* using pressurized liquids . Food Chemistry, 102(4), 1357–1364 . <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.07.065>
- MICHKA . (2005) . La spiruline pour l'homme et la planète . Terra Magna Georg .
- Mühling, M ., Harris, N ., Belay, A ., & Whitton, B . A . (2003) . Reversal of helix orientation in the cyanobacterium *Arthrospira* . Journal of Phycology, 39(2), 360–367 . <https://doi.org/10.1046/j.1529-8817.2003.02190.x>
- Mishra, M ., Shrivastav, A ., & Chaudhary, R . (2006) . Antioxidant potential of blue green alga *Spirulina platensis* . Indian Journal of Clinical Biochemistry, 21(2), 130–132 . <https://doi.org/10.1007/BF02912919>
- Mishra, V . K ., Bacheti, R . K ., & Husen, A . (2011) . Medicinal uses of chlorophyll: A critical overview . In H . Le & E . Salcedo (Eds.), *Chlorophyll: Structure, function and medicinal* (pp. 177–196) . Nova Science Publishers .
- Mojisola, A . (2020) . La spiruline africaine: origine (Tchad), bienfait et usage . La Nouvelle Tribune .
- Moradi, S ., Foshati, S ., Poorbaferani, F ., Talebi, S ., Bagheri, R ., Amirian, P ., Parvizi, F ., Nordvall, M ., Wong, A ., & Zobeiri, M . (2023) . Les effets de la supplémentation en spiruline sur le fer sérique et la ferritine, les paramètres d'anémie et le sang occulte dans les selles chez les adultes atteints de colite ulcéreuse : Un essai randomisé, en double aveugle et contrôlé par placebo . Clinical Nutrition ESPEN, 57, 755–763 . <https://doi.org/10.1016/j.clnesp.2023.08.019>
- M'hamed, H . (2010, 5 avril) . La spiruline, une algue en quête d'une mise en valeur . Nouara Algérie . Consulté le 03 février 2025, sur <https://afroandalou.over-blog.com/article-la-spiruline-une-algue-en-quete-d-une-mise-en-valeur-par-m-hamed-h-47949169.html>
- Marzorati, S ., Schievano, A ., Idàb, A ., & Verotta, L . (2020) . Carotenoids, chlorophylls

Les références bibliographiques

and phycocyanin from Spirulina: Supercritical CO₂ and water extraction methods for added value products cascade . Green Chemistry, 22, 187–196 .<https://doi.org/10.1039/C9GC02864B>

Les références bibliographiques

-Mugaonkar,B .(2022) .Activitéethnobotaniqueetpharmacologiqued'Arthrospiraplatensis . Journal International de Recherche en Sciences Appliquées et en Technologie de l'Ingénierie

N

-NiangoranN'Goran,U .F .(2017) .Optimisationde laculturedelaspirulineenmilieu contrôlé : Éclairage et estimation de la biomasse (Thèse de doctorat) . Université Toulouse 3, Paul Sabatier, Toulouse, France .

O

-Odjadjare,E .C .,Mutanda,T ., & Olaniran,A .O .(2017) .Potentialbiotechnological applicationofmicroalgae: Acriticalreview . CriticalReviews inBiotechnology, 37(1),37–52 .
<https://doi.org/10.3109/07388551.2015.1076360>

-Ozdemir,G .,Karabay,N .U .,Dalay,M .C ., & Pazarbasi,B . (2008)
.Antibacterial activity of volatile components and various extracts of *Spirulina platensis* .
Phytotherapy Research, 22(9), 1243–1246 . <https://doi.org/10.1002/ptr.2468>

P

- Parejo, I ., Viladomat, F ., Bastida, J ., Rosas-Romero, A ., Flerlage, N ., Burillo, J ., & Codina, C . (2002) . Comparison between the radical scavenging activity and antioxidant activity of six distilled and nondistilled Mediterranean herbs and aromatic plants .
Journal of Agricultural and Food Chemistry, 50(23), 6882–6890 .<https://doi.org/10.1021/jf020556i> .

- Patel, S ., & Goyal, A . (2013) . Current and prospective insights on food and pharmaceuticalapplicationsofspirulina .Current TrendsinBiotechnologyandPharmacy,7(2), 681–695 .

-Pugh, N ., Ross, S . A ., ElSohly, H . N ., ElSohly, M . A ., & Pasco, D . S . (2001) . Isolation of threehighmolecularweight polysaccharidepreparationswithpotent immunostimulatoryactivity fromSpirulina platensis, Aphanizomenon flos-aquae and Chlorella pyrenoidosa . Planta Medica, 67 737–742 . <https://doi.org/10.1055/s-2001-18346>

- Pentecost,A .(1991) .Calcificationprocessesinalgaeandcyanobacteria .InR .Riding(Ed .), Calcareous algae and stromatolites (pp . 3–20) . Springer Berlin Heidelberg .https://doi.org/10.1007/978-3-642-74964-9_1

-Performe .(2022,23mai) . Comment laspirulineest-ellecultivée?Performe .Consultéle3 février 2025, sur <https://www.performe.co/blog/spiruline-culture> .

-Pierlovisi,C .(2008) . Compositionchimiquedelaspiruline .ColloqueInternationalsur la Spiruline, Toliara, Sud-Ouest de Madagascar .

Les références bibliographiques

Q

-Qureshi, M .A ., & Hunter, R . (1995) . Proceedings of the 44th Western Poultry Disease Conference (pp . 117–121) . Sacramento, California .

R

-Rajesh, K .; Rohit, G .; Venkata Mohan, S . Microalgae-based carotenoids production . In *Algal Green Chemistry*; Rastogi, R . P ., Madamwar, D ., Pandey, A ., Eds .; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2017; pp . 139–147 . [Google Scholar]

-Roshan, H . K . T . (2024) . Exploration des applications polyvalentes de la spiruline : Une revue complète de la recherche . *International Journal of Advanced Biochemistry Research*, 8(11S), 87–93 . <https://doi.org/10.33545/26174693.2024.v8.i11Sb.2799>

-Ross E ., Dominy W . The nutritional value of dehydrated, blue-green algae (*Spirulina platensis*) for poultry . *Poultry Science* . May 1990; 69(5):p . 794-800 .

S

-Safaei, M ., Maleki, H ., Soleimani-Zad, S ., & Behrouzian, F . (2019) . Optimization of bioactive compounds extraction from *Spirulina platensis* using response surface methodology . *Food Science & Nutrition*, 7(8), 2747–2755 . <https://doi.org/10.1002/fsn3.1109> .

-Sialve, B ., & Steyer, J .-P . (2013) . Les microalgues : Promesses et défis . *Innovations Agronomiques*, 26, 25–39 . <https://doi.org/10.17180/26qw-gb86> .

-Sall, M . G ., Dankoko, B ., Badiane, M ., Ehua, E ., & Kuakuwi, N . (1999) . *La spiruline: une source alimentaire à promouvoir* . *Médecine d'Afrique Noire*, 46(3), 141 .

-Shao, W ., Ebaid, R ., El-sheekh, M ., Abomohra, A . E ., & Eladel, H . (2019) . Pharmaceutical applications and consequent environmental impacts of *Spirulina (Arthrospira)*: An overview . *Grasas y Aceites* .

-Sanzo, G . D ., Mehariya, S ., Martino, M ., Larocca, V ., Casella, P ., Chianese, S ., Musmarra, D ., Balducchi, R ., & Molino, A . (2018) . Supercritical carbon dioxide extraction of astaxanthin, lutein, and fatty acids from *Haematococcus pluvialis* microalgae . *Marine Drugs*, 16(334), 1–17 . <https://doi.org/10.3390/md16090334> .

-Seladji, M ., Belmekki, N ., Azmani, I ., Bouziani, I ., & Bendimerad, N . (2013) . Phytochemical screening of two Algerian medicinal plants . *Université de Tlemcen, Algérie* .

-Sharma, A ., Sharma, P ., & Chaudhary, A . (2019) . *Spirulina: A miracle of nutrition* . *International Journal of Chemical Studies*, 7(2), 1572–1577 .

Les références bibliographiques

- Sharma, A ., et al . (2019) . *Spirulina platensis*, un "aliment ultime"; une analyse . Journal International de Recherche en Sciences Appliquées et en Technologie de l'Ingénierie .
- Shmitz, T . (2014) . Les incroyables propriétés de la phycocyanine . Principes de Santé, (72) .
- Sialve, B ., & Steyer, J . P . (2013) . Les microalgues, promesses et défis .
- Safaei, M ., Maleki, H ., Soleimanpour, H ., & Gharanjig, K . (2020) . Antioxidant and cytotoxic activity of methanolic extracts from *Spirulina platensis* . Journal of Applied Phycology, 32(3), 1837–1845 . <https://doi.org/10.1007/s10811-020-02084-0>
- Sguera, S . (2008) . *Spirulina platensis* et ses constituants : intérêts nutritionnels et activités thérapeutiques (Thèse de doctorat en pharmacie) . Université Henri Poincaré - Nancy 1, France . http://docnum.univlorraine.fr/public/SCDPHA_T_2009_LAURENTDARGENT_JONATHAN.pdf Soulef Boussahel, Dahamna, S ., Ruberto, G ., Siracusa, L ., & Harzallah, D . (2013) . Pharmacognosy Communications, 3(1), 46 .
- Sousae Silva, A ., de Magalhães, W . T ., Moreira, L . M ., Rocha, M . V . P ., & Bastos, A . K . P . (2018) . Extraction assistée par micro-ondes de polysaccharides d'*Arthrospira (Spirulina) platensis* en utilisant le concept de chimie verte . Algal Research, 35, 178–184 .
- T**
- Tabagari, I ., Kurashvili, M ., Varazi, T ., Adamia, G ., Gigolashvili, G ., Pruidze, M ., Chokheli, L ., Khatisashvili, G ., & Niemsdroff, P . F . (2019) . Application of *Arthrospira* .
- Talukdar, J ., Dasgupta, S ., Nagle, V ., & Bhadra, B . (2020) . COVID-19: Potential of microalgae-derived natural astaxanthin as adjunctive supplement in alleviating cytokine storm . SSRN . <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3579738>
- Tamigneaux, É ., & Johnson, L . E . (2016) . Les macroalgues du Saint-Laurent : une composante essentielle d'un écosystème marin unique et une ressource naturelle précieuse dans un contexte de changement global . Le Naturaliste canadien, 140(2), 62–73 . <https://doi.org/10.7202/1036505ar>
- Tasende, M . G ., & Peteiro, C . (2015) . Cultivo de macroalgas en España: Situación actual y perspectivas . Algas, 49(2), 12–22 .
- Thoré, E ., Muylaert, K ., Bertram, M ., & Brodin, T . (2023) . Microalgues . Biologie actuelle .
- Timbo, B . (2003) . Étude photochimique et des activités biologiques de *Trichilia emetica* Vahl (Thèse de doctorat) . Faculté de Médecine et de Pharmacie .

Les références bibliographiques

- Tokusoglu, Ö ., & Ünal, M .K . (2003) . Biomass nutrient profiles of three microalgae: *Spirulina platensis*, *Chlorella vulgaris* and *Isochrysis galbana* .
- Tranquille, M ., Adda, C ., & Flourié, F . (2012) . Étude de la composition chimique de la spiruline selon les conditions de culture .
- Trease, G . E ., & Evans, W . C . (1989) . Pharmacognosy (13e éd .) . Londres : Baillière Tindall .
- Tremblin, G ., & Moreau, B . (2017) . La spiruline sera-t-elle l'aliment miracle du XXI^{ème} siècle ? Article, Le Mans Université . URL: Department of Clinical Laboratory Sciences, College of Applied Medical Sciences, Shaqra University . Asia Pacific Journal of Research in Biological and Pharmaceutical Sciences . <http://www.soeagra.com/abr.html>

V

- Vidalo, J . L . (2015) . *Spiruline*, l'algue bleue de santé et de prévention . Chapitre 3 : Cancer et spiruline, p . 101 ; Chapitre 16 : Universelle spiruline, à chacun son profil, p . 240 .
- Vicat, J . P ., Doumnang Mbaigane, J . C ., Dingamtar Ndjadode, N ., Guideal, R ., & Bellion, Y . (2016) . Teneurs en éléments majeurs et traces de spirulines (*Arthrospira platensis*) .
- Vonshak, A . (1997) . *Spirulina platensis (Arthrospira)*: Physiology, cell-biology and biotechnology . Taylor & Francis . <https://doi.org/10.1201/9781482272970> .
- Vonshak, A . (2002) . *Spirulina platensis Arthrospira*: Physiology, Cell-Biology and Biotechnology (2e éd .) . Taylor & Francis .

W

- Wang, H ., Zhao, X ., Lin, M ., Dahlgren, R . A ., Chen, W ., Zhou, J ., Xu, C ., Jin, C ., Xu, Y ., Wang, X ., Ding, L ., & Bao, Q . (2013) . Proteomic analysis and qRT-PCR verification of temperature response to *Arthrospira (Spirulina) platensis* . PLoS ONE, 8(12), e83485 . <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0083485>
- Wang, Z ., et al . (2005) . Réversion morphologique de la spiruline (*Arthrospira platensis*): de la forme linéaire à la forme hélicoïdale . Journal International de Recherche en Sciences Appliquées et en Technologie de l'Ingénierie .
- Wild, K . J ., Steingäß, H ., & Rodehutscord, M . (2018) . Variabilité de la composition nutritionnelle et de la digestibilité in vitro des protéines brutes de 16 produits à base de microalgues . Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition, 102, 1306– 1319 . <https://doi.org/10.1111/jpn.12953>

Les références bibliographiques

- Wang, Z. P., & Zhao, Y. (2005). Morphological reversion of *Spirulina (Arthrospira) platensis* (Cyanophyta): From linear to helical. *Journal of Phycology*, 41(3), 622–628. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3113.2005.00351.x>
- Wittrock, V. B., & Nordstedt, C. F. O. (1899). *Algae aquae dulcis exsiccatae*, fascicule XIV, N° 679. *Descriptiones systematicae dispositae*, p. 59.



Annexe

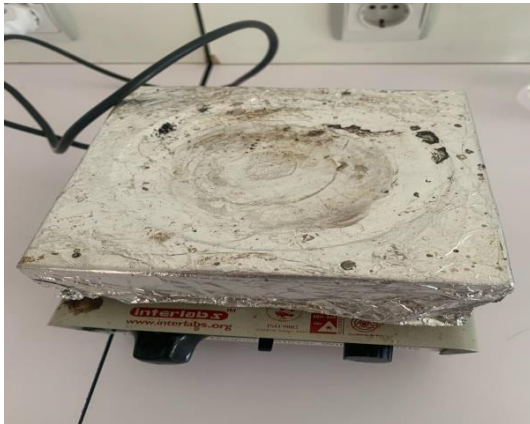
Annexes

ANNEXE

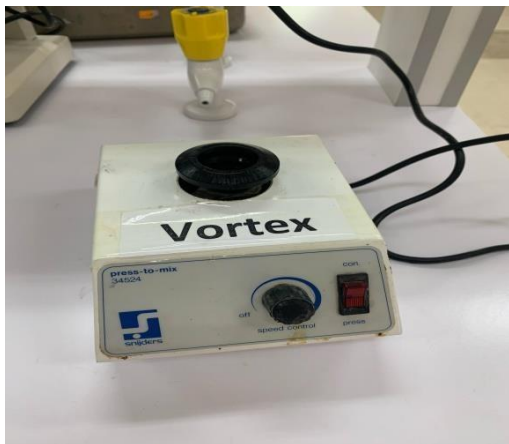
Appareillage



Agitateur



Bain-marie



Vortex



Centrifugeuse



Lampe-uv



Spectrophotométrie



Balance analytique

Annexes

Les tests phytochimiques qualitatifs réalisés sur l'extrait brut de Spirulina



Les Dosage: Sucre, protéines, dosage des polyphénols, flavonoïdes

