

N série:



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
*Ministère d'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique*
جامعة الشهيد حمزة لخضر الوادي
Université Echahid Hamma Lakhdar El Oued
كلية علوم الطبيعة والحياة
Faculté des sciences de la nature et de la vie
قسم البيولوجيا الخلوية والجزيئية
Département de biologie Cellulaire et Moléculaire



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de Master Académique en Sciences
biologiques

Spécialité: Biochimie Appliquée

Thème

**Etude comparative des valeurs nutritionnelles de
spiruline cultivée dans deux régions différentes en
Algérie**

Présenté Par:

M^{elle}: DERDOURI Djihane

M^{elle}: KAROUI Ithar

M^{elle}: DERDOURI Yousra

Devant le jury composé de:

Présidente: Mme LAOUFI Hayet

M.A.A, Université d'El Oued

Examineur: M MEDJOUR Abdelhak

M.A.A, Université d'El Oued

Promoteur: M KIRAM Abderrazak

M.A.A, Université d'El Oued

Année universitaire 2021-2022

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

**“ Le savoir que l’on ne complète pas chaque
jour diminue tous les jours “**



Remerciement

Tout d'abord, nous remercions Dieu de nous avoir donnés la capacité d'écrire et de penser, la force et la patience pour continuer à réaliser notre rêve.

*Nous tenons à remercier le **Dr Kiram Abderrazak** encadreur de cette thèse pour son approbation et sa direction de ce travail et sa confiance en nous.*

Nous remercions chaque membre du jury de nous avoir honorés en tant que membres du comité de notre thèse.

*Tous nos remerciements à l'équipe du laboratoire, dirigée par **Mme Goubi Sana**, la responsable du laboratoire. Merci pour votre patience et votre soutien tout au long de ce travail.*

Nous remercions tous les professeurs qui nous ont aidés à réaliser nos recherches.

Enfin, nous remercions tous les amis qui nous ont accompagnés tout au long de l'étape de l'éducation et tous ceux qui nous ont soutenus de notre famille.

Merci à tous



Dédicace



Je dédie ce mémoire:

Aux personnes les plus chères au vie, à mes chers parents. Vous m'avez toujours soutenu et encouragé durant ces longues années d'études.

*Que ce travail soit le fruit de vos prières et sacrifices, qui m'ont été d'un grand secours pour atteindre cette étape important de ma vie, Merci, **maman** et **papa**, et je vous souhaite à tous les deux une bonne santé.*

A l'âme de mon cher frère "Houcine", qu'Allah lui fasse miséricorde

A ma sœur "Siham" et ses enfants: Khaled - Belgacem - Sara - Assil et Roumiassa.

A mes chers frères: Kamel – Mourad – Toufik – Ayoub et leurs enfants: Houcine - Larine - Djouri - Rafif - Ritadj - Kossai - Louai - Rassem.

A ceux qui m'ont encouragé et soutenu dans les moments les plus difficiles.

A toutes mes amies, en particulier ma chère amie "Ithar", qui m'a accompagnée tout au long de mon parcours universitaire et qui a été comme une sœur.

Enfin, je dédie cordialement cette thèse à tous mes proches et à toute ma famille

Djihane



Dédicace

Louange à Dieu, et cela suffit et prières soient sur le bien-aimé Mustafa, sa famille et ceux qui sont fidèles.

Grâce à Dieu, qui nous a permis d'apprécier cette belle étape de notre parcours académique avec ce mémoire, fruit d'efforts et de réussite par sa grâce est dédié aux honorables parents, que Dieu les préserve et les perpétue comme une lumière pour mon parcours j'ai dédié ce travail à l'âme de ma grande mère la paix à son âme.

Aux compagnons de route qui ont partagé ses moments avec moi, que Dieu leur accorde le succès.

A tous ceux qui ont contribué à m'enseigner même avec une lettre dans ma vie universitaire en particulier mon professeur d'école primaire Ahmed Daou, que Dieu bénisse sa vie et fasse de lui un modèle de don et de don.

Je dédie également ce modeste travail à toute la famille éducative de l'université Hama Lakhdar.

Au final, j'espère que cette mémoire sera une bougie qui éclaire les esprits et rend les cœurs heureux, et que nous avons contribué ne serait-ce qu'un peu à baguage scientifique.

Yousra





Dédicace

J'ai le plaisir de dédier ce modeste travail à :

L'âme de mon cher grand-père KAROUI Athmane qui a été le pilier de ma carrière universitaire

Ceux que j'ai tant aimé avec beaucoup d'affection et dont je suis très fière de les avoir et tout les mots du monde ne peuvent exprimer l'amour et le respect que je leur porte, Mes chers Parents

Mes grands-mères: BEN ABDALLAH Saida et SLIMANI Meriem

Mes sœurs: Thana et son mari Oussama ,Ines, Rayane, Ritadj et Meriem

Mes chers frères :Tadj Eddine et Ahmed Yacine

Mes cousins qui ont une empreinte sur ma réussite: Fakhr Eddine et Khair Eddine

Ma chère amie "Djihane"

Toutes les personnes qui ont participé à L'élaboration de ce travail à tous ceux que j'ai omis de citer.



Ithar

RÉSUMÉ

Résumé

Résumé

L'objectif de notre étude est l'évaluation des valeurs nutritionnelles d'*Arthrospira platensis* (spiruline) cultivée dans deux régions différentes en Algérie.

Nous avons évalué les valeurs nutritionnelles de la spiruline: la teneur en protéine par la méthode de Kjeldahl, la teneur en lipide par la méthode de Soxhlet et la teneur en carbohydrate par la méthode de Dubois.

Ces évaluations ont montré que: la teneur en protéine (62,5 %) dans la spiruline X2 est supérieure à celle de la spiruline X1, alors que la teneur en carbohydrate (22 %) et lipide (6 %) dans la spiruline X1 est supérieure à celle de la spiruline X2.

L'évaluation de la qualité microbiologique des deux spirulines (X1 et X2) a montré une absence totale des germes pathogènes ceci est due aux bonnes pratiques d'hygiène lors de la culture de spiruline.

Les rendements d'extraction aqueuse de spiruline par différentes méthodes: macération, infusion et décoction ont montré que l'extraction par macération a donné un bon rendement avec un taux de 21.5% .

Enfin, notre étude nous a permis de connaître l'algue de spiruline cultivée en Algérie et nous avons conclu que la spiruline (X1 et X2) ayant une bonne qualité nutritionnelle.

Mots clés: *Arthrospira platensis*, spiruline, valeurs nutritionnelles, Algérie, extraction aqueuse.

Abstract

Abstract

The objective of our study is the evaluation of the nutritional values of *Arthrospira platensis* (spirulina) cultivated in two different regions in Algeria.

We evaluated the nutritional values of spirulina: the protein content by Kjeldahl method, the lipid content by Soxhlet method and the carbohydrate content by the Dubois method.

These evaluation showed that: the protein content (62.5%) in spirulina X2 is superior to that of spirulina X1, while the carbohydrate (22%) and lipid (6%) content in spirulina X1 is superior to that of spirulina X2.

The evaluation microbiological quality of the two spirulina (X1 and X2) showed a total absence of pathogenic germs, this is due to good hygiene practices during the cultivation of spirulina.

The yields of aqueous extraction of spirulina by different methods: maceration, infusion and decoction showed that the extraction by maceration gave a good yield with a rate of 21.5%.

Finally, our study allowed us to know the spirulina algae cultivated in Algeria and we concluded that spirulina (X1 and X2) having a good nutritional quality.

Key words: *Arthrospira platensis*, spirulina, nutritional values, Algeria, aqueous extraction.

الهدف من دراستنا هو تقييم القيمة الغذائية للأرتروسيرا بلاتنسيس *Arthrospira platensis* (سبيروлина) المزروعة في منطقتين مختلفتين في الجزائر.

قمنا بتقييم القيمة الغذائية للسبيروлина: محتوى البروتين بواسطة Kjeldahl، محتوى الدهون بواسطة Soxhlet و محتوى الكربوهيدرات بطريقة Dubois، أظهر هذا التقييم أن: محتوى البروتين (62.5%) في سبيروлина X2 أعلى من سبيروлина X1 بينما محتوى الكربوهيدرات (22%) والدهون (6%) في سبيروлина X1 أعلى من سبيروлина X2 .

كما أظهرت تقييمات الجودة الميكروبيولوجية للسبيروлина (X1 , X2) الغياب التام للجراثيم المرضية، ويرجع ذلك إلى ممارسات النظافة الجيدة أثناء زراعة سبيروлина.

نتج مردود الاستخلاص المائي للسبيروлина بطرق مختلفة: النقع البارد ، النقع الساخن و الغلي أظهر أن الاستخلاص بالنقع البارد أعطى مردود جيد قدره 21.5%.

أخيرا، سمحت لنا دراستنا بمعرفة طحالب سبيروлина المزروعة في الجزائر واستنتجنا أن السبيروлина (X1 , X2) لها جودة غذائية جيدة.

الكلمات المفتاحية: أرتروسيرا بلاتنسيس، سبيروлина، القيمة الغذائية، الجزائر، الاستخلاص مائي.



**LISTE DES
ABRÉVIATIONS**

Liste des abréviations

Liste des abréviations

AA: Acide Arachidonique

AG: Acide Gras

AGL: Acide gamma-linolénique

AGPI: Acides Gras Polyinsaturés

AGS: Acide Gras Saturé

AGMI: Acide Gras Monoinsaturé

ALA: Acide α -Linoléique

AJR: Apport Journalier Recommandé

BEHTAM: Boileau Etienne Hiri Abdelkader Tamanrasset

Ca: Calcium

CO₂: Dioxyde de carbone

DHA: acide docosahexaénoïque

EPA: Acide eicosapentaénoïque

Fe: Fer

FAO: Food and Agriculture Organization - Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.

J: jours

K: Potassium

Mg: Magnesium

N: Azote

NADPH: Nicotinamide Adenine Dinucléotide Phosphate

O₂: Dioxygène

P: Phosphore

Liste des abréviations

S: Soufre

SOD: Super Oxyde Dismutase

VIH: Virus de l'immunodéficience humaine



SOMMAIRE

Sommaire

Sommaire

<i>Remerciement</i>	
<i>Dédicace</i>	
Résumé	
Liste des abréviations	
Sommaire.....	
Liste des figures.....	
Liste des tableaux	
Introduction générale.....	2

Première Partie: Synthèse Bibliographique

Chapitre I

Présentation d'*Arthrospira platensis*

I. Présentation d' <i>Arthrospira platensis</i>	6
I.1. Définition des microalgues.....	6
I.2. Définition de la spiruline.....	6
I.3. Morphologie	7
I.4. Taxonomie.....	8
I.5. Ecologie de la spiruline	8
I.6. Reproduction et cycle de vie d' <i>Arthrospira platensis</i>	9
I.7. Culture de la spiruline	10
I.7.1. Milieu de culture	11
I.7.2. Condition de culture	12
I.8. Applications principales d' <i>Arthrospira platensis</i>	13
I.8.1 En alimentation humaine.....	13
I.8.2. En médecine	14
I.8.3. En cosmétique	14
I.8.4. En agroalimentaire	14
I.8.5. Autres applications.....	14

Première Partie: Synthèse Bibliographique

Chapitre II

Biochimie d'*Arthrospira platensis*

Sommaire

II. Biochimie d' <i>Arthrospira platensis</i>	17
II.1. Compositions biochimiques de la spiruline	17
II.1.1. Protéines et acides aminés	17
II.1.2. Lipides et acides gras	18
II.1.3. Glucides	19
II.1.4. Vitamines	19
II.1.5. Pigments.....	20
II.1.6. Minéraux et oligo-éléments	23
II.1.7 Enzymes.....	24
II.2. Photosynthèse	24

Première Partie: Synthèse Bibliographique

Chapitre III

Activités Biologiques d'*Arthrospira platensis*

III.1 Activités Biologiques de la spiruline.....	28
III.1.1 Activité Anti-oxydante	29
III.1.2Activité Anti-microbienne.....	29
III.1.3 Activité Anti-inflammatoire	30
III.1.4 Activité Anti-cancéreuse	31
III.1.5 Activité Anti-virale.....	32
III.1.6 Activité Anti-hypercholestérolémiant.....	33
III.1.7 Autres effets.....	34

DEUXIEME PARTIE: Etude Expérimentale

Chapitre I

Matériel et Méthodes

I. Matériel	37
I.1. Matériel Biologique	37
II. Méthodes.....	38
II.1. Analyses des valeurs nutritionnelles de spiruline	38
II.1.1. Teneur en protéine	38
II.1.2. Teneur en carbohydrate.....	39
II.1.3. Teneur en lipide	40
II.1.4. Valeur énergétique.....	41

Sommaire

II.1.5. Teneur en Fer	42
II.2. Analyses microbiologiques de la spiruline	42
II.2.1. Préparation de la suspension mère et dilutions décimales:	42
II.2.2. Recherche et dénombrement des germes aérobies mésophiles (GAMT) (AFNOR, NF 08-051, 1991)	43
II.2.3. Dénombrement des coliformes totaux et des coliformes fécaux (NF 08-060 (1996) /ISO 72185).....	44
II.2.4. Recherche et dénombrement de <i>Staphylococcus aureus</i>	45
II.3. Evaluation nutritionnelle des extrait aqueux de spiruline.....	45
II.3.1. Extraction aqueuse	45
II.3.2. Détermination des rendements d'extraits secs.....	46

DEUXIEME PARTIE: Etude Expérimentale

Chapitre II

Résultats et discussions

I. Resultats et discussions	49
I.1. Résultats des analyses des valeurs nutritionnelles de spiruline.....	49
I.1.1. Teneur en Protéine, lipide et carbohydate.....	49
I.1.2. Valeur énergétique	51
I.1.3. Teneur en élément de fer	52
I.2. Résultats des analyses microbiologiques	53
I.3. Rendements d'extraction	53
Conclusion	56
Références bibliographiques.....	59
Annexes	69



LISTE DES FIGURES

Liste des figures

Liste des figures

N°	Titre	Page
01	La spiruline	7
02	Différentes formes prises par la spiruline. (A) spiralée, (B) ondulée, (C) droite	7
03	Le cycle de vie d' <i>Arthrospira platensis</i>	9
04	Courbe de croissance théorique d'une population de microalgues en fonction du temps	11
05	Structures chimiques de la phycocyanine et de phycocyanobiline	21
06	Structure de hémoglobine et de la chlorophylle- α	22
07	La photosynthèse	26
08	Activités de la spiruline	28
09	(a) spiruline X2 (b) spiruline X1	37
10	Extracteur soxhlet	41
11	Étapes expérimentales d'extraction aqueuse	47
12	Comparaison des valeurs nutritionnelle d' <i>Arthrospira platensis</i> cultivée en 02 régions différentes	49
13	Comparaison entre les valeurs énergétique de spiruline X1 et X2	51
14	Comparaison de l'élément de fer entre spiruline X1 et X2	52
15	Rendements de l'extrait des trois méthodes (décoction, infusion, macération)	54



**LISTE DES
TABLEAUX**

Liste des tableaux

Liste des tableaux

N°	Titre	Page
01	Comparaison de teneur en protéines de la spiruline avec d'autre aliments	17
02	Acides aminés essentiels de la spiruline en gramme pour 100 g de protéines	18
03	Principaux acides gras de la spiruline	19
04	Quantités des pigments dans la spiruline	22
05	Composition en minéraux de la spiruline et doses requises	23
06	Matériel utilisé	37
07	Valeur physiologique des nutriments	42
08	Résultats des analyses microbiologiques	53

INTRODUCTION

GÉNÉRALE

Introduction générale

Introduction générale

Le monde a récemment connu une large propagation de maladies et d'épidémies dues à la malnutrition et à la pauvreté en particulier dans les régions Sud d'Afrique et c'est ce qui a conduit au développement de la science de la nutrition dans une approche préventive pour réduire ce phénomène, c'est-à-dire en développer des recommandations nutritionnelles stipulées dans des directives nationales ou internationales visant à renforcer le rôle de l'alimentation dans le maintien de l'état de santé ou la réduction du risque de maladie leur traitement en utilise les plantes médicinales aromatiques tels que : Thym , Lavande , Menthe..., ainsi que les microalgues .

Les microalgues sont des organismes unicellulaires photosynthétiques, à la base de la chaîne alimentaire en milieu aquatique. De par leur biodiversité et leur grande faculté d'adaptation, elles sont présentes sur l'ensemble des surfaces du globe des océans (soit $\frac{2}{3}$ de la surface terrestre) aux glaces arctiques, en passant par les lacs hyper-salés, les neiges éternelles, les forêts humides et les murs de nos maisons.

Majoritairement cultivées depuis plus de 30 ans pour la nutrition animale en aquaculture, mais aussi pour la cosmétologie et plus récemment pour leur intérêt dans les secteurs de la pharmacie et de l'énergie, les microalgues sont aussi un produit alimentaire **(Gael et Bruno, 2014)**.

Le groupe des cyanobactéries, anciennement appelées algues bleues, compte parmi l'une des plus anciennes formes de vie sur Terre qui comprend le genre *Spirulina* ou *Arthrospira*, particulièrement dénommée *Spirulina platensis* (ou *Arthrospira platensis*). Consommée depuis des siècles par certains peuples primitifs d'Afrique et d'Amérique et connue par les scientifiques depuis plusieurs décennies pour sa richesse nutritionnelle. Compte tenu de ses caractéristiques, la culture de la spiruline pourrait être une solution pour améliorer la santé humaine. Outre des propriétés nutritionnelles avérées, la spiruline connaît aujourd'hui un regain d'intérêt de la part de la communauté scientifique internationale du fait de sa possible utilisation comme source de produits à vertus thérapeutiques. En effet, le potentiel de cette microalgue semble être important et ceci principalement grâce à son principal pigment, la phycocyanine, donnant à cet organisme sa couleur bleu-vert caractéristique. Certaines études ont en outre mis en évidence des activités sur le système immunitaire, le cancer, le sida mais aussi des effets dans la lutte contre le vieillissement cellulaire, des propriétés hépatoprotectrices, anti-inflammatoires **(Seguera, 2008)**.

Introduction générale

En Algérie, le premier mini-colloque sur la spiruline à été à Tamanrasset entre le 18 et 25 Avril 2004, des chercheurs et des scientifiques ayant une expérience de culture et des utilisations de spiruline sont venus de France sur l'invitation de monsieur Abdelkader HIRI. La principale "matière première" de la spiruline est la lumière solaire et le natron c'est la base du milieu de culture puisque les régions à climat désertiques sont riches en natron, ce qui est le cas de Tamanrasset sont donc a priori bien placées pour cultiver la spiruline (**Seguera, 2008**).

A cette raison, quelle est les valeurs nutritionnelles d'*Arthrospira platensis* cultivée en Algérie?

L'objectif de cette étude : la détermination de la composition biochimique d'*Arthrospira platensis* cultivée dans deux régions différentes en Algérie, et différentes techniques d'extraction et l'évaluation de sa qualité nutritionnelle .

Cette étude se divise en deux parties principales: Le premier est la synthèse bibliographique est divisé en trois chapitres:

Chapitre I est la présentation d'*Arthrospira platensis*

Chapitre II sur la Biochimie d'*Arthrospira platensis*

Chapitre III Activités biologiques de la spiruline

La deuxième partie (étude expérimental) comprend deux chapitres : le première intitulé matériel et méthodes et la deuxième chapitre est consacrée aux résultats et discussions et à la fin de ce travail se termine par une conclusion.

Première Partie

Synthèse Bibliographique

CHAPITRE I :

Présentation d'*Arthrospira*

platensis

I. Présentation d'*Arthrospira platensis*

I.1. Définition des microalgues

Les algues sont un groupe de plantes connues depuis les civilisations anciennes. le terme algues a été introduit pour la première fois par Linnaeus en 1753 et Jussieu en 1789 qui a classé les plantes et délimité les algues du reste du monde végétale à son état actuel (**Sahoo et Seckbach, 2015**).

Elles sont des espèces qui vivent toutes en milieu aquatique (**Barry et al., 2014**) et comprennent 18% du règne végétale (**Morère et Pujol, 2002**).

Les algues sont divisée par dimensions en macroalgues (algues macroscopiques) et microalgues (algues microscopiques).

Les macroalgues sont des algues multicellulaire de taille proche du centimètre et qui croissent le plus souvent dans des bassins naturels d'eau douce ou d'eau salée (**Tebbani et al., 2014**).

Les microalgues sont principalement des organismes unicellulaires photosynthétiques vivant en milieu aquatique ou en environnement terrestre humide ou aérien. La morphologie et la taille des microalgues varient très fortement en fonction des espèces et des groupes taxonomiques. Les microalgues sont des organismes eucaryotes qui possèdent les principales caractéristiques de la cellule eucaryote végétale.

Les microalgues se distinguent des cyanobactéries qui sont des organismes procaryotes longtemps qualifiés «d'algues bleues». La spiruline représentant très connu de ce groupe est donne une bactérie photosynthétique et non une algue (**Fleurence, 2021**).

I.2. Définition de la spiruline

La spiruline dont le nom scientifique est «*Arthrospira platensis*» (**Doudou et al., 2008**) appartient aux bactéries photosynthétiques oxygéniques qui recouvrent les groupes Cyanobactéries et Prochlorales figure (01). Ce sont des cyanobactéries filamenteuses et non hétérokystes que l'on trouve généralement dans les régions tropicales et subtropicales dans des plans d'eau chauds à forte teneur en carbonate/bicarbonate, pH et salinité élevés (**Ali et Saleh, 2012**).

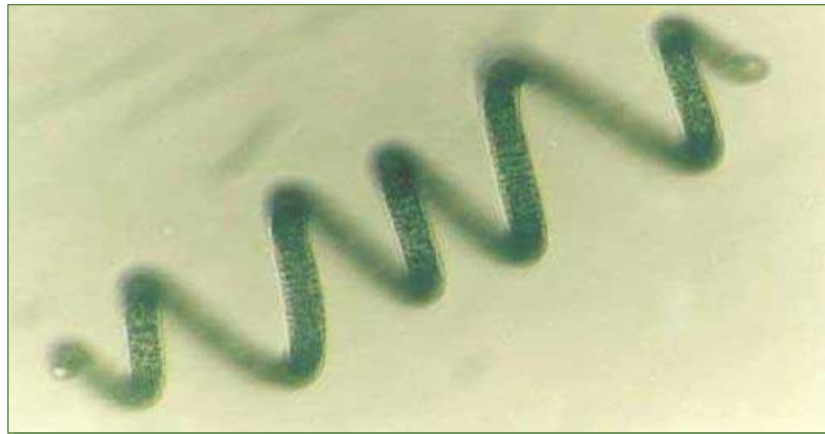


Figure 01: La spiruline (Jourdan, 2012)

I.3. Morphologie

La spiruline est une microalgue uni ou multicellulaire et filamentaire. C'est une bactérie grâce à sa structure procaryote qui possède une membrane pluristratifiée de 4 couches. Son nom dérivé de la configuration physique spiralée et hélicoïdale de ses filaments, en latin "spira" signifie enroulement (Manet, 2016). Ce filament est appelé "trichome " à un longueur variable (généralement de 50 à 500 μm) et un diamètre proche de 3 à 12 μm , mais les dimensions des cellules, le degré d'enroulement et la longueur des filaments varient selon les espèces (Habib et al., 2008) .

On distingue plusieurs morphologies "spiralées", "ondulées" et "droites" figure (02) (Tsarahevitra, 2005), cette particularité est en relation directe avec les conditions écologiques rencontrées dans leur habitat. (Charpy et al., 2008).

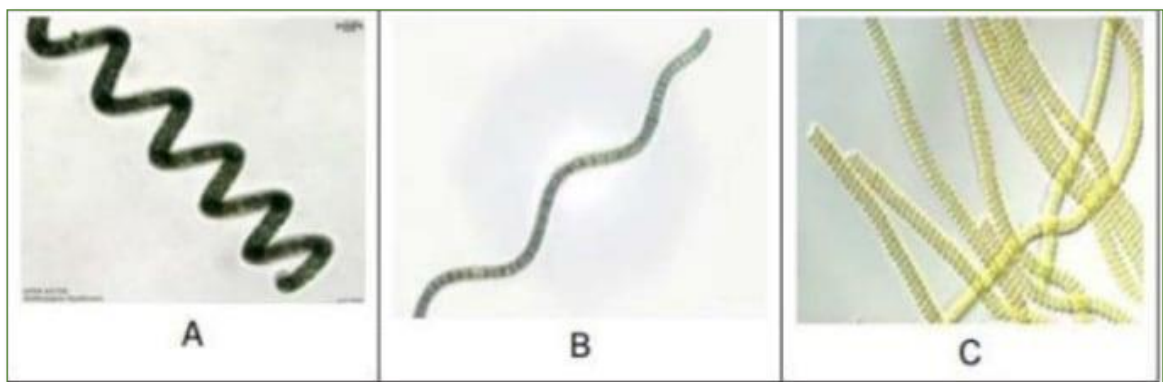


Figure 02: Différentes formes prises par la Spiruline.

(A) spiralée, (B) ondulée, (C) droite (Charpy et al., 2008)

I.4. Taxonomie

La Spiruline est une cyanobactérie (anciennement désignée par le terme «algue bleue» puis cyanophycée). Elle appartient donc au domaine des bactéries (Bacteria) et se classe parmi les bactéries gram négatives. Les cyanobactéries forment l'essentiel des bactéries capables de photosynthèse avec production d'oxygène(Charpy et al., 2008).

On la classe selon Ripley Fox (1999) dans:

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

I.5. Ecologie de la spiruline

Le développement de la spiruline, qu'elle soit à l'état sauvage ou en culture contrôlée nécessite un environnement comprenant de l'eau, une zone de température adaptée, de la lumière pour fournir de l'énergie à la photosynthèse, un équilibre nutritif acido-basique et un pH favorable. La spiruline pousse dans les lacs sodiques de tous les continents. Il peut supporter de très fortes concentrations de sel. Sa croissance est optimale à des concentrations de 22 à 60 g/l de sel. Le pH optimum d'une culture florissante se situe entre 9 et 11. La température optimale de croissance de la Spiruline est comprise entre 32°C et 40°C, avec une fourchette de 18 à 50°C. Le facteur limitant de la croissance est la température diurne qui ne doit pas descendre en dessous de 20°C (Tedjani et al., 2013).

Sa forte plasticité écologique permet de la retrouver à l'état naturel à la fois dans les lacs alcalins en Afrique (Tchad, Ethiopie, Tunisie), en Amérique latine (Mexique, Pérou), en Asie du Sud (Inde, Sri Lanka, Thaïlande). Cet organisme est dit ubiquiste. Il est cependant beaucoup moins abondant en Amérique du Nord et en Europe (Charpy et al., 2008).

I.6. Reproduction et cycle de vie d'*Arthrospira platensis*

La spiruline croît de 25% par jour, sa quantité peut donc doubler en 4 jours. Sa reproduction est végétative (asexuée) et s'effectue par scission simple ou multiple par bourgeonnement ou encore par fragmentation au hasard.

Le cycle de vie d'*Arthrospira platensis* est illustré à la figure (03). Essentiellement, le cycle de vie est simplement un cycle de vie cellulaire, commençant par une seule spirale, qui est ensuite divisé en cellules d'hormogonie qui se développent à nouveau dans le temps en une seule spirale.

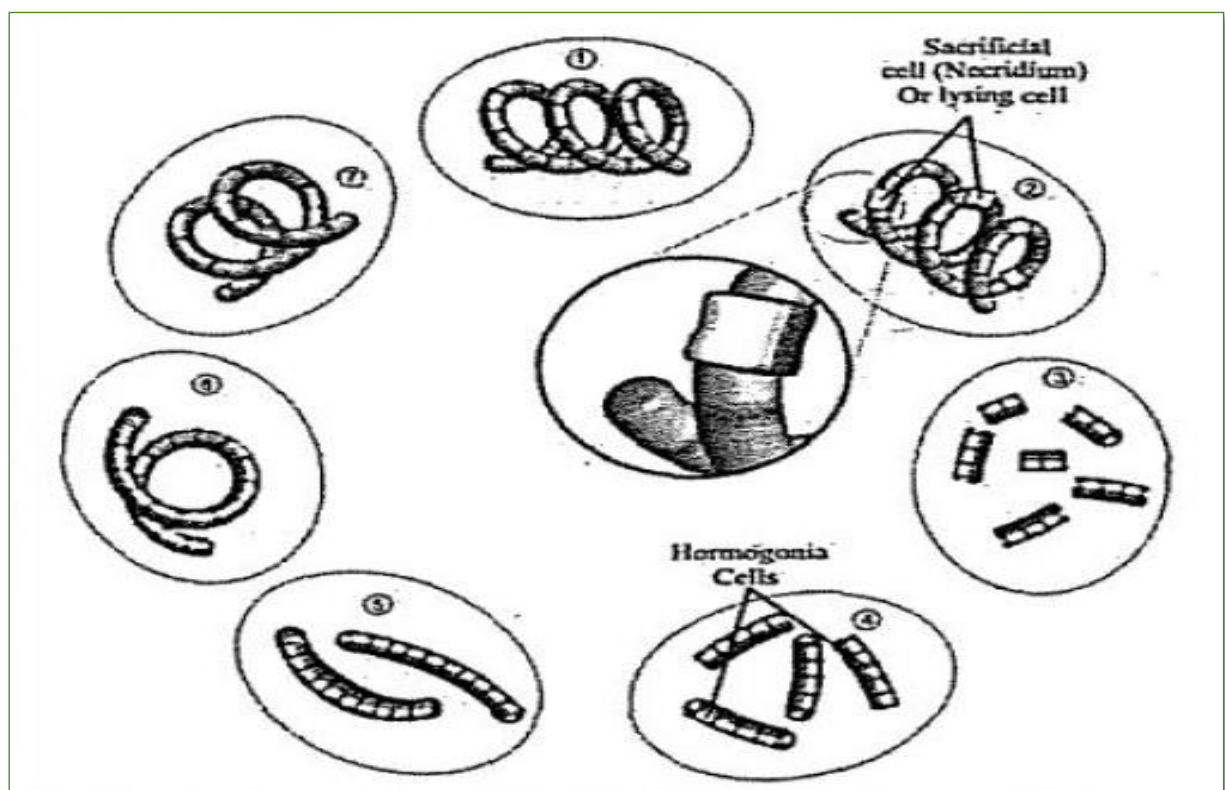


Figure 03: Le cycle de vie de *Arthrospira platensis* (Sánchez et al., 2003)

Le cycle de vie d'*Arthrospira platensis* est caractérisé par trois étapes fondamentales: la fragmentation des trichomes, les processus d'agrandissement et de maturation des cellules d'hormogonie et l'élongation des trichomes (Ali et Saleh, 2012). Le trichome mature est décomposé en deux à quatre chaînes de cellules par des cellules spécialisées appelées nécridies. Ces cellules spécialisées subissent une lyse, ce qui entraîne le glissement de plusieurs disques créant plusieurs cellules d'hormogonie. La formation de trichomes comprenant les cellules nécridies est visible.

Ces cellules s'éloignent ensuite de la cellule mère pour se développer en un nouveau trichrome. Pour que la cellule devienne un nouveau trichrome, ils perdent les parties attachées des cellules nécrionales, les rendant arrondies aux extrémités avec peu ou pas d'épaisseur dans les parois (Ciferri, 1983).

I.7. Culture de la spiruline

La culture de la spiruline à grande échelle a commencé il y a 30 ans au Mexique et en Chine et plus tard dans d'autres parties du monde, en raison des conditions faciles de culture. La spiruline la plus cultivée est produite dans des étangs à canal ouvert, avec des roues à aubes utilisées pour agiter l'eau. Les plus grands producteurs commerciaux de spiruline sont situés aux États-Unis, Thaïlande, Inde, Taïwan, Chine, Bangladesh, Pakistan, Birmanie (Myanmar) en Grèce et au Chili. La spiruline est principalement connue à travers le monde pour sa valeur nutritionnelle potentielle (Nicoletti, 2016).

Les microalgues sont capables de se multiplier de manière rapide dans des conditions favorables de culture. Ces conditions de croissance vont faire varier la composition des cellules ainsi que les quantités et les caractéristiques des différentes substances qu'elles produisent (Clément-Larosière, 2012).

La croissance des microalgues se déroule en cinq phases peuvent être décrites d'après cette figure (04):

- **Phase 1: phase de latence:** La cellule a besoin d'un temps d'acclimatation aux nouvelles conditions de culture qui lui sont appliquées; la croissance est très faible.
- **Phase 2: phase d'accélération:** Les cellules ont accumulé suffisamment de composés intracellulaires et ont doublé leur matériel génétique. La population va commencer à croître grâce à la reproduction végétative. Les cellules se divisent donc en deux cellules filles identiques contenant chacune la moitié du contenu de la cellule mère et qui par la suite se diviseront elles-mêmes en deux.
- **Phase 3: phase exponentielle:** La vitesse de croissance de la culture reste constante et maximale. Les conditions du milieu sont optimales pour la croissance cellulaire. La quantité moyenne des constituants cellulaires ainsi que l'évolution de la population sont constantes.
- **Phase 4: phase stationnaire:** Un des éléments du milieu va venir à manquer (lumière, azote, phosphore, carbone,...) et en conséquence la vitesse de croissance diminue. Cependant tant que les cellules possèdent des produits de stockage leur permettant d'alimenter leur métabolisme, elles survivent. Certains composés, tel que les lipides et les glucides, vont

continuer à s'accumuler dans les cellules pendant cette période. La quantité de cellules qui se reproduisent est égale à la quantité de cellules qui meurent donc la concentration cellulaire est constante (Clément-Larosière, 2012).

- **Phase 5: phase de décroissance:** La majorité des cellules ont épuisés leurs réserves intracellulaires, elles ne peuvent donc plus produire l'énergie nécessaire pour les processus de maintenance cellulaire et elles meurent. La quantité de cellules qui meurent est fortement supérieure à la quantité de cellules pouvant encore se reproduire. Certaines espèces de microalgue sont capables de se mettre en dormance cellulaire lorsque les conditions environnementales sont défavorables (Clément-Larosière, 2012).

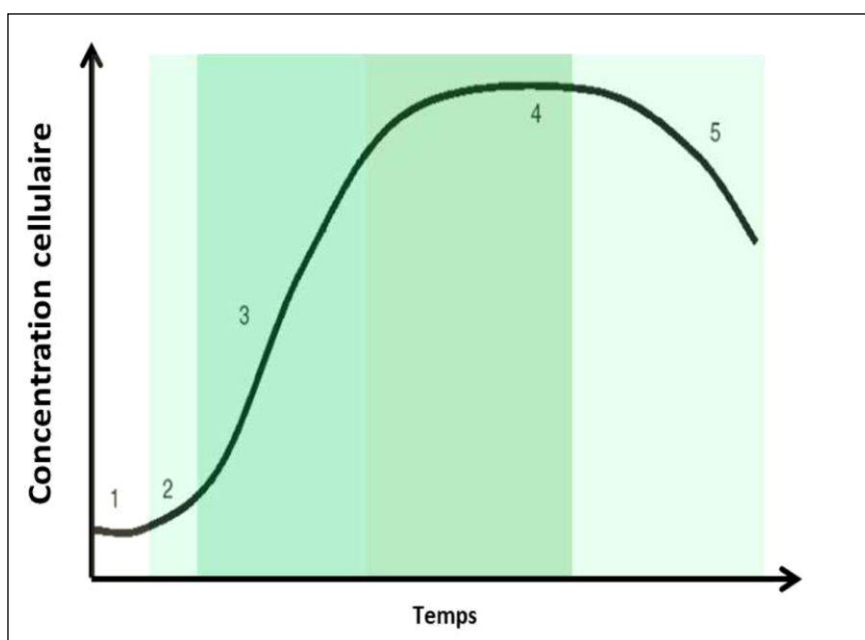


Figure 04: Courbe de croissance théorique d'une population des microalgues en fonction du temps (Clément-Larosière, 2012)

I.7.1. Milieu de culture

Les spirulines vivent dans une eau à la fois salée et alcaline.

- L'eau:** utilisée pour le milieu de culture doit être de préférence potable ou au moins filtrée, le plus important étant l'élimination des algues étrangères. condition toutefois que l'ensemencement initial en spirulines soit assez concentré.
 - Alcalinité et salinité :** pour raisons d'économie , avec une salinité totale de 13 g/L et une alcalinité de 0,1 g/L mais ces concentrations peuvent être doublées sans inconvénient.
- L'alcalinité est habituellement apportée par du bicarbonate de sodium, mais ce dernier peut être remplacé en partie par de la soude caustique ou du carbonate de sodium qui

ont d'ailleurs l'avantage de relever le pH initial du milieu de culture. Le natron ou trona peuvent aussi être utilisés.

- La salinité: est apportée par des fertilisants et du sel (chlorure de sodium). Le sel de cuisine peut être utilisé mais il contient souvent 2% de magnésie insoluble pouvant être à l'origine d'excès de boues minérales.

En plus du sel et de la soude, le milieu de culture contient des engrais pour assurer la croissance des spirulines comme en agriculture habituelle: azote (N), phosphore (P), potassium (K) sont les trois principaux éléments, mais soufre (S), magnésium (Mg), calcium (Ca) et fer (Fe) doivent aussi être ajoutés s'ils ne sont pas apportés en quantité suffisante par l'eau, le sel et les engrais.

Les sources d'azote préférées des spirulines sont l'ammoniac et l'urée, mais ces produits sont toxiques au-delà d'une concentration limite (l'urée s'hydrolyse peu à peu en ammoniac) (Jourdan, 2012).

I.7.2. Condition de culture

Il existe trois facteurs essentiels déterminants pour la culture de la spiruline la température, la lumière et le pH.

I.7.2.1. Température

La température optimale pour la croissance de la spiruline est d'environ 35 à 38 °C, tandis que la température minimale requise pour une certaine croissance est d'environ 15 °C (Belay, 2002).

Des températures supérieures à 40°C ne lui conviennent pas et elle meurt lorsqu'elle est exposée à 43°C (Fox, 1999).

I.7.2.2. Lumière

Comme en diminuant l'éclairement on diminue aussi la photosynthèse totale il faut, si possible éviter la photolyse. Autrement dit deux conditions sont nécessaires pour la croissance de la Spiruline:

* Ensemencer le bassin avec assez d'algues pour que la lumière ne puisse pas atteindre le fond du bassin. La vérification peut se faire avec un simple disque de Secchi.

* Agiter suffisamment la culture pour que les filaments individuels ne restent pas plus d'une demi-minute à la surface en plein soleil, mais plongent et remontent fréquemment.

Les « roues à aubes » constituent les systèmes d'agitation les plus utilisés; le but est de remuer l'eau et non de créer un dénivellement comme on le croit généralement (Fox,1999).

I.7.2.3. pH

Le pH du milieu est l'un des facteurs les plus importants dans la culture de la Spiruline.

Le maintien d'un pH supérieur à 9,5 est obligatoire dans les cultures de spiruline afin d'éviter la contamination par d'autres algues. L'ajustement du pH est effectué en fournissant du gaz CO₂ au milieu. Comme dans d'autres installations de culture de masse à grande échelle, le système d'alimentation ou d'admission de CO₂ utilisé est un compromis entre un transfert de gaz efficace, le coût en capital et le coût de fonctionnement du système (Belay, 2002).

I.8. Applications principales d'*Arthrospira platensis*

La spiruline intéresse de nombreux domaines très divers

I.8.1 En alimentation humaine

La spiruline a été utilisée comme additif dans une variété d'aliments humains. La production actuelle de spiruline dans le monde est estimée à environ 3000 tonnes métriques. Actuellement, plus de 70 % du marché de la spiruline est destiné à la consommation humaine, principalement en tant que complément alimentaire en raison de sa richesse en protéines, acides aminés essentiels, minéraux, vitamines et acides gras essentiels (Koru, 2012).

Le conférence mondiale de la population et la conférence mondiale de l'alimentation l'ont déclaré mieux demain, l'organisation mondiale de la santé a constaté que la spiruline était un excellent aliment pour la consommation humaine. les gens utilisent la spiruline dans leur propre stratégie de soins personnels pour plus d'énergie, d'assurance nutritionnelle, de contrôle du poids et de nettoyage. les athlètes et les joggeurs découvrent plus d'endurance et de force, les seniors trouvent une meilleure absorption des nutriments, il est idéal et sans danger pour les enfants, les femmes enceintes et allaitantes (Unnikrishnan Nair, 2013).

I.8.2. En médecine

Des essais cliniques ont montré que la spiruline peut servir de traitement complémentaire pour de nombreuses maladies (**Ghaeni et Roomiani, 2016**) grâce à ses grands effets dans d'importantes applications thérapeutiques:

- Effet anticancéreux
- Effet hypoprotéïnémique
- Effet protecteur contre l'obésité et le diabète (**Demisu et Benti, 2018**).

Les capsules de spiruline se sont avérées efficaces pour abaisser le taux de lipides dans le sang, réduire les globules blancs après radiothérapie et chimiothérapie, ainsi que pour améliorer la fonction immunitaire (**Ghaeni et Roomiani, 2016**).

La spiruline exerce également d'autres activités pharmacologiques, c'est-à-dire qu'elle renforce l'immunité de l'organisme contre les bactéries pathogènes, les champignons, les virus à ARN, y compris la grippe et le coronavirus et prévient les maladies inflammatoires ou le stress oxydatif cellulaire (**Ragusa et al., 2021**).

I.8.3. En cosmétique

L'abondance de composés bioactifs naturels rend les extraits d'*Arthrospira* parfaits pour une utilisation dans les cosmétiques commerciaux. Les formules contenant de la «spiruline» sont principalement vendues comme produits anti-âge qui combattent l'action des radicaux libres, hydratent et protègent la peau. En raison de son activité antimicrobienne, des cosmétiques contre l'acné et d'autres infections bactériennes de la peau (**Furmniak et al, 2017**).

I.8.4. En agroalimentaire

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

I.8.5. Autres applications

Arthrospira platensis peut également être appliqué comme agent de phytoremédiation pour nettoyer les eaux chimiquement polluées. Les cellules de l'*Arthrospira*

contiennent de grandes quantités de composés (enzymes, peptides, acides aminés, etc.) capables de se lier sous forme d'ions de métaux lourds à des composés organiques toxiques (Tabagari et *al.*, 2019).

CHAPITRE II

Biochimie *d'Arthrospira*

platensis

II. Biochimie d'*Arthrospira platensis*

II.1. Compositions biochimiques de la spiruline

La spiruline est considérée comme une source alimentaire de haute qualité nutritive, en raison notamment de sa haute digestibilité (Bellhacen et al., 2013).

La spiruline est l'une des sources les plus riches en protéines. Sa teneur en protéines jusqu'à 70%, ainsi que des quantités élevées d'acides gras essentiels, d'acides aminés essentiels, de minéraux, de vitamines (en particulier B12), de pigments antioxydants (phycobiliprotéines et caroténoïdes) et de polysaccharides (Madkour et al., 2012).

II.1.1. Protéines et acides aminés

Arthrospira platensis représente une source alternative de protéines et un complément ou additif alimentaire (Avila-Leon et al, 2012).

La teneur en protéines de la spiruline varie entre 50 et 70 % de son poids sec. Ces niveaux sont assez exceptionnels, même chez les micro-organismes (Hajati et Zaghari, 2019).

Le pourcentage des protéines dans la spiruline est beaucoup plus élevé que dans le poisson (25%), du soja (35%), de la poudre de lait (35%) et des céréales (14%) tableau (01). La spiruline est très riche en matières azotées et en contient deux fois plus que le soja, trois fois plus que la viande ou le poisson (Charpy et al, 2008).

Tableau01: Comparaison de teneur en protéines de la spiruline avec d'autre 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%

D'un point de vue qualitatif, les protéines de la spiruline sont complètes car tous les acides aminés essentiels y figurent comme le montre le tableau (02) et ils représentent 47 % du poids total des protéines. Parmi ces acides aminés les plus faiblement représentés sont les acides aminés soufrés: méthionine et cystéine, qui sont toutefois présents à plus de 80 % de la valeur idéale définie par la FAO (Falquet et Hurni, 2006).

Tableau02: Acides aminés essentiels de la spiruline en gramme pour 100 g de protéines (Clément, 1975)

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

II.1.2. Lipides et acides gras

Le taux de lipides dans les spirulines est d'environ 5 à 6 % (Sall et al., 1999). Les acides gras (AG) sont répartis de manière équivalente entre les polyinsaturés (AGPI) et les saturés (AGS), les monoinsaturé (AGMI) constituant environ 6 % du total (Bard, 2018).

La principale particularité de la spiruline est sa relative richesse en acide gamma-linoléique (oméga 6) qui représente 40% des acides gras de la spiruline (Hug et von der weid, 2011) dont elle est ainsi considérée comme l'une des meilleures sources végétales.

En particulier, la spiruline fournit également de l'acide γ -linoléinique (ALA), de l'acide stéaridonique (SDA), de l'acide eicosapentaénoïque (EPA), l'acide docosahexaénoïque (DHA) et l'acide arachidonique (AA) tableau (03) (Hbib et al., 2008).

Tableau 03: Principaux acides gras de la spiruline (Falquet et Hurni, 2006)

Profile typique des acides gras de la spiruline (<i>Arthrospira sp</i>)	
Acide gras	% des acides gras totaux
palmitique (16:0)	25-60%
palmitoléique (16:0)	0.5-10%
stéarique (18:0)	0.5-2%
oléique (18:1) oméga-6	5-16%
linoléique (18:2) oméga-6	10-30%
gamma-linolénique (18:3) oméga-6	8-40%
alpha-linolénique (18:3) oméga-3	Absent

II.1.3. Glucides

Les glucides représentent 15 à 25% de la matière sèche des spirulines (Cohen, 2002). L'essentiel des glucides assimilables est constitué de polymères tels que des glucosannes aminés (1,9% du poids sec) et des rhamnosannes aminés (9,7%) ou encore de glycogène (0,5%) . Les glucides simples ne sont présents qu'en très faibles quantités (glucose, fructose et saccharose) on trouve aussi des polyols comme le glycérol, le mannitol et le sorbitol (Falquet et Hurni, 2006).

Du point de vue nutritionnel, la seule substance glucidique intéressante par sa quantité chez la spiruline est le méso-inositol phosphate qui constitue une excellente source de phosphore organique ainsi que d'inositol (350-850 mg/kg de matière Sèche) (Hajati et Zaghari, 2019).

II.1.4. Vitamines

La spiruline a un excellent mélange de vitamines, y compris les vitamines A, B1, B2, B6, B12, E et H (Anvar et Nowruzi, 2021). La spiruline est très riche en vitamines du groupe B, notamment en vitamine B12 puisqu'elle en contient 4 fois plus que le foie de veau. Même

si la biodisponibilité de cette vitamine B12 n'est pas clairement établie (seulement 17 % serait absorbée et donc active chez l'Homme), la spiruline demeure une source exceptionnellement élevée pour un végétal.

D'autre part, Provitamine A (β -carotène)(jusqu'à 80% des caroténoïdes totaux) (**Pierlovisi, 2008**): Parmi les vitamines liposolubles, on note une teneur très élevée en β -carotène. L'organisme humain convertit ce pigment en vitamine A en quantité nécessaire à ses besoins. Une étude récente de Wang et *al.* Portant sur des chinois adultes montre que l'ingestion de 4,5 mg de β -carotène provenant de la spiruline apporte 1mg de vitamine A. Il faudrait prendre entre 3 et 6 g de spiruline pour couvrir les besoins journaliers recommandés chez l'adulte (900 μ g). En ce qui concerne les enfants de 6 mois à 3 ans, compte tenu de leur besoin journalier en cette vitamine (300 - 500 μ g), il leur faudrait une dose de spiruline entre 1 et 3 g/j (**Hug et Von der weid, 2011**).

La vitamine E est retrouvée à des taux comparables aux germes de blé. Les vitamines A et E, connues pour leurs propriétés antioxydants ont un intérêt biologique chez l'homme et assurent aussi une bonne conservation d'autres constituants de la spiruline (acides gras...). Ces molécules sont cependant fragiles et leur bonne conservation dépendra de certains procédés de fabrication: ainsi, un séchage à basse température, tout comme une granulométrie grossière limitent la dégradation de ces molécules (**Pierlovisi, 2008**).

L'apport vitaminique des spirulines est estimé comme suit:

- Vitamine A 100 à 240 UI % gr
- Vitamine B1 3 à 4 mg % gr
- Vitamine C 20 mg % gr
- Vitamine E 0, 1 mg % gr (**Sall et al., 1999**).

II.1.5. Pigments

La spiruline contient de nombreux pigments dont la chlorophylle a, la xanthophylle, le bêta-carotène, l'échinénone, la myxoxanthophylle, la zéaxanthine, la canthaxanthine, la diatoxanthine, la 3 hydroxyéchinénone, la bêta-cryptoxanthine, l'oscillaxanthine, ainsi que les phycobiliprotéines c-phycoyanine et allophycoyanine (**Habib et al.,2008**).

La spiruline contient des pigments principaux naturels bleu, vert et orange distinctifs à savoir respectivement des phycocyanines, des chlorophylles et des caroténoïdes (Marzorati *et al.*, 2020).

la phycocyanine responsable de la coloration bleue elle est le pigment le plus abondant de spiruline et représente plus de 15 % du poids de la spiruline (Sall *et al.*, 1999). Il contient un chromophore tétrapyrrole à chaîne ouverte appelé phycocyanobiline, qui est lié de manière covalente à l'apoprotéine.

La structure chimique de la phycocyanobiline et de la phycocyanine est illustrée à la figure (05). En effet, plusieurs rapports ont montré que la phycocyanine possède des propriétés anti- oxydantes, anti-inflammatoires. La phycocyanine est également largement utilisée comme colorant naturel dans les aliments et les cosmétiques et est également utilisée pour la production de produits pharmaceutiques (Zheng *et al.*, 2013).

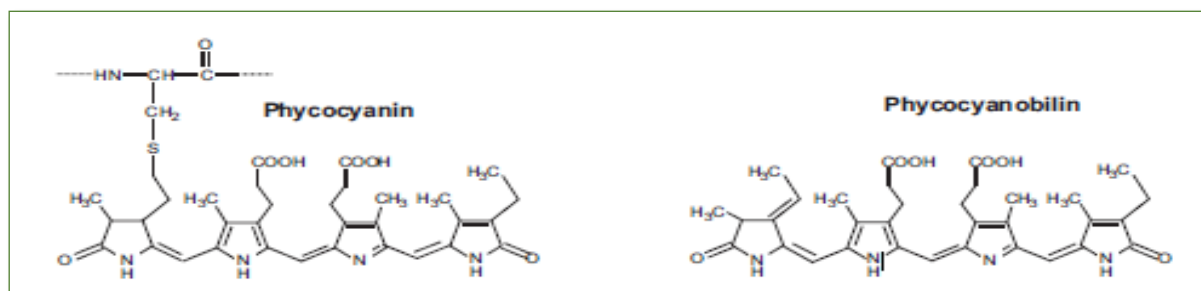


Figure 05: Structures chimiques de la phycocyanine et de la phycocyanobiline (Zheng *et al.*, 2013)

- La chlorophylle est un pigment vert principale pour les organismes photosynthétiques, y compris les plantes et les algues.

La spiruline contient 1% de son poids sec en chlorophylle, laquelle ne diffère de hémoglobine humaine figure (06), que par un atome de magnésium pour la chlorophylle et fer pour le sang (Debleds, 2015).

De plus la chlorophylle s'associe à un cofacteur, la porphyrine (composant également présent dans la spiruline), pour chélater les métaux lourds, mercure, plomb, arsenic, ou nickel et les éliminer de l'organisme. La chlorophylle augmente le péristaltisme et soulage ainsi la constipation, elle normalise aussi la sécrétion digestive acide et la pepsine responsable d'ulcères digestifs (Manet, 2016).

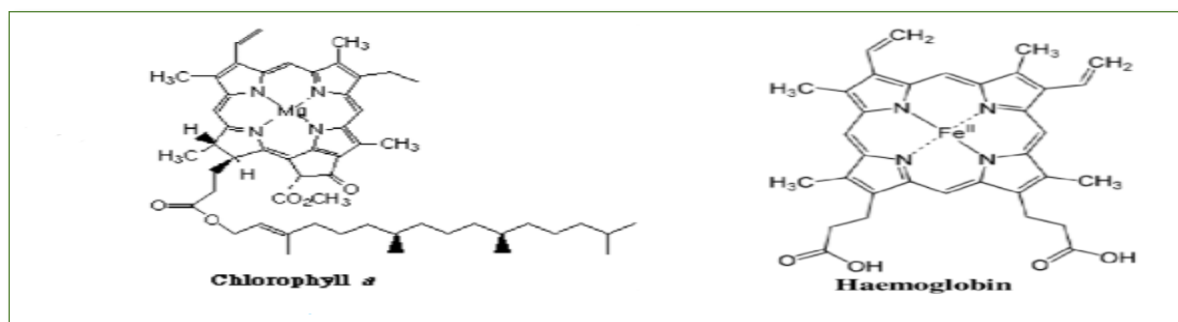


Figure 06: Structure de l'hémoglobine et de la chlorophylle- α (Manoj *et al.*, 2015)

- Les caroténoïdes sont des pigments lipophiles naturels responsables des couleurs rouge, jaune et orange présentes dans de nombreux organismes vivants (Marzorati *et al.*, 2020). Selon Borowitzka (1988), il existe plus de 400 caroténoïdes connus et très peu d'entre eux sont utilisés commercialement, notamment le β -carotène (licophine), la zéaxanthine, l'astaxanthine et la lutéine (Saleh *et al.*, 2011). Ils fonctionnent principalement comme aides à la photosynthèse et sont utilisés dans le processus de photoprotection. Les humains et les autres animaux sont incapables de synthétiser les caroténoïdes et de les acquérir par l'alimentation. Les caroténoïdes sont utilisés dans l'alimentation humaine et animale en tant que colorants et arômes et dans les suppléments nutritionnels en tant que source de provitamine A. Les avantages pour la santé des caroténoïdes pour les humains et les animaux sont de plus en plus apparent. Par exemple, il existe des preuves que ces pigments peuvent protéger les humains de troubles graves associés au stress oxydatif et inflammatoire, notamment la dégénérescence et le vieillissement de la peau, les maladies cardiovasculaires, certains types de cancer et les maladies oculaires liées à l'âge, telles que la dégénérescence maculaire ou la cataracte (Park *et al.*, 2018). Les quantités des principaux pigments dans la spiruline sont présentées dans le tableau (04) (Hajati et Zaghari, 2019).

Tableau 04: Quantités des pigments dans la spiruline (Hajati et Zaghari, 2019)

Pigments	mg 100 g ⁻¹
Total carotenoids	400-500
Carotène	160-260
Xanthophyll	170-240
Chlorophyll	1300-1700
Phycocyanin	15000-19000

II.1.6. Minéraux et oligo-éléments

La spiruline est naturellement riche en certains minéraux essentiels, particulièrement importants lors de malnutrition (**Hug et Von der weid, 2011**), Les minéraux d'intérêt particulier dans la spiruline sont le fer, le calcium, le phosphore et le potassium (**Liestianty et al., 2019**). La composition en minéraux de la spiruline apparaît dans le tableau (05).

Tableau 05: Composition en minéraux de la spiruline et doses requises (**Falquet et Hurni, 2006**)

Minéraux	Teneur (mg/kg)	Doses requises (mg/jour)
Calcium	1300 – 14000	1200
Phosphore	6700 – 9000	1000
Magnésium	2000 – 4000	250 – 350
Fer	600 – 6000**	18
Zinc	21 – 6000**	15
Cuivre	8 – 2000**	1,5 – 3
Chrome	2,8	0,5 – 2
Manganèse	25 – 37	5
Sodium	4500	500
Potassium	6400 – 15400	3500
Sélénium	0,01 – 50**	0,05

** Valeurs obtenues par enrichissements spécifiques

- **Fer**

La spiruline a une très haute teneur en fer (550-6000 mg/kg) est à souligner doublement du fait que les carences en fer sont très répandues (anémies ferriprives), surtout chez les femmes et les enfants et que les bonnes sources alimentaires de fer sont rares. Par comparaison les céréales complètes, classées parmi les meilleures sources de fer, n'en contiennent que 150 à 250 mg/kg (**Falquet et Hurni, 2006**).

- **Zinc**

Chez l'Homme, le zinc est essentiel au bon fonctionnement du système immunitaire et les personnes souffrant d'une carence importante présentent une susceptibilité accrue à divers agents pathogènes. La spiruline cultivée sans apport intentionnel de zinc au milieu de

culture n'en contient généralement que des traces (21-40 µg/g), alors qu'on peut en trouver dans certaines spirulines naturelles près de 400 µg/g. Ces valeurs sont insuffisantes pour que ces spirulines puissent être considérées comme de bonnes source de zinc, car les apports journaliers recommandés (AJR) sont de 0.6 à 3 mg/j chez un nourrisson/enfant (ces variations dépendent du type de régime alimentaire associé), de 4 à 12 mg/j pour un adolescent et de 3 à 8 mg/j chez l'adulte (Falquet et Hurni, 2006).

- **Calcium et phosphore** sont présents à des taux comparables à ceux retrouvés dans le lait et dans des proportions qui excluent tout risque de décalcification par apport excessif de phosphore.
- La spiruline est aussi une bonne source de **magnésium** biodisponible chez l'homme.
- **Potassium** est richement représenté dans la spiruline, atout intéressant dans les pays industrialisés où le rapport sodium/potassium est souvent trop élevé (Pierlovisi, 2008).

II.1.7 Enzymes

La spiruline contient un certain nombre d'enzymes. L'une des enzymes les plus importantes est la super oxyde dismutase (SOD) qui est importante pour éteindre les radicaux libres et retarder le vieillissement. Cette enzyme essentielle est cruciale pour la capacité du corps à assimiler les acides aminés. Sans la présence de SOD dans le corps, nous sommes incapables de créer les 10 000 chaînes longues et complexes d'acides aminés appelées protéines. En fait, la spiruline a une activité enzymatique si élevée que même après avoir été séchée (à 160 °C) elle recommencera souvent à pousser si elle est placée dans le bon milieu, la bonne température et la bonne lumière solaire. Il a été scientifiquement démontré que la spiruline augmente la reproduction des lactobacilles (bactéries qui digère nos aliments). Il contient plus de 2000 enzymes différentes (Mishra et al., 2013).

II.2. Photosynthèse

La photosynthèse est un processus métabolique par lequel tous les organismes photoautotrophes, c'est-à-dire les bactéries photosynthétiques, les cyanobactéries (*Arthrospira platensis.*, *Synechococcus sp.*, *Anabaena sp.*, etc.) et les plantes supérieures, sont capables de convertir l'énergie lumineuse en énergie chimique (Mouhanti et al., 1997).

Au plan chimique, les molécules de départ sont le CO₂ et l'eau; les produits sont toutes les biomolécules et particulièrement les molécules de réserve, hydrates de carbone et corps gras qui permettent aux organismes de durer et de se multiplier.

Les algues et un groupe de bactéries appelées cyanobactéries sont les seuls organismes capables d'effectuer la photosynthèse. Parce qu'ils utilisent la lumière pour fabriquer leur propre nourriture (Clark et al., 2018).

Au cours de la photosynthèse oxygénée chez les cyanobactéries et les plantes supérieures, l'énergie lumineuse est utilisée pour transporter électrons de l'eau vers le NADP⁺ avec un dégagement concomitant d'oxygène. L'ATP et le NADPH générés au cours de ce processus guidé par la lumière sont ensuite utilisés pour la conversion enzymatique du CO₂ atmosphérique en glucides.

La photosynthèse se déroule en deux phases couplées:

- La phase photochimique aussi appelée phase claire, se déroule dans les thylakoïdes des chloroplastes. Elle convertit l'énergie lumineuse absorbée par les pigments chlorophylliens en énergie chimique sous forme d'ATP et de composés réduits RH₂. L'oxydation de l'eau libère de l'O₂ dans l'atmosphère.
- La phase chimique aussi appelée phase sombre a lieu dans le stroma des chloroplastes. Au cours des réactions chimiques constituant le cycle de Calvin-Benson, le CO₂ est incorporé grâce à une enzyme la Rubisco, à un glucide à 5 atomes de carbone, le Ru-BP figure (07). Le triose phosphate formé est à l'origine de la synthèse des différentes molécules organiques.

La phase chimique ne nécessite pas directement de la lumière, mais elle consomme les composés réduits RH₂ et l'ATP formés au cours de la phase photochimique. Elle dépend donc de cette première phase (Galiana et al., 2015).

L'équation-bilan résumant l'ensemble des réactions de la photosynthèse s'écrit:



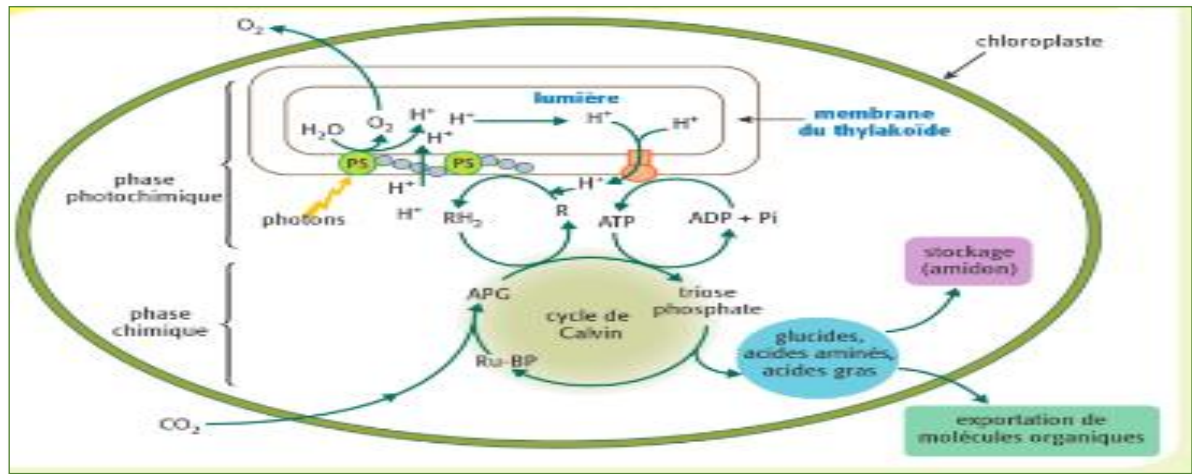


Figure 07: La photosynthèse (Galiana et al., 2015)

CHAPITRE III

Activités Biologiques

d'Arthrospira platensis

III. Activités Biologiques d'*Arthrospira platensis*

III.1 Activités Biologiques de la spiruline

Comme démontré précédemment *Spirulina platensis* de par sa composition riche et variée, n'a pas d'égal. Jusqu'à tout récemment, l'intérêt pour la spiruline portait uniquement sur sa valeur nutritive. Cependant, à l'heure actuelle bon nombre de chercheurs étudient les activités thérapeutiques possibles de ce microorganisme telles que l'activité anti-oxydante, anti-inflammatoire, anticancéreuse, antimicrobienne, antidiabétique et obésité... (Shao et al., 2019).

La spiruline possède plusieurs activités, en voici les principales répertoriées dans la figure (08) suivant:

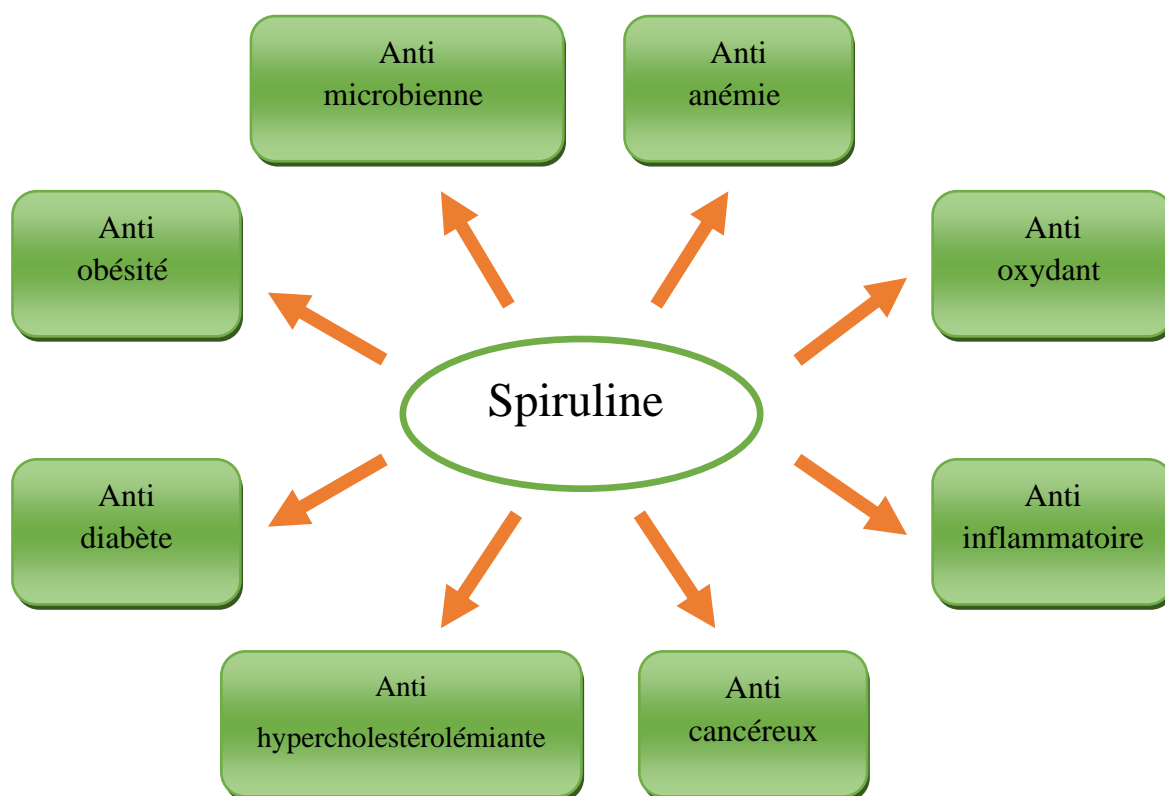


Figure 08: Activités de la spiruline

III.1.1 Activité Anti-oxydante

Ces dernières années, les antioxydants sont devenus l'objet de plusieurs études en biologie médicale. Ce qui a attiré l'attention des chercheurs est la découverte d'un phénomène concernant tous les processus dégénératifs: Sous l'influence du soleil, du stress, du tabac, de la pollution, ou d'une alimentation déséquilibrée, nos cellules peuvent mal fonctionner, et parfois l'ADN peut être endommagé; provoquant des cellules mutées à l'origine de cancers. Ce phénomène est ce qu'on appelle aujourd'hui le stress oxydatif qui un phénomène favorisé par la présence des radicaux libres. Les radicaux libres sont des espèces chimiques possédant un électron unique sur leur couche périphérique. Ils sont produits de manière physiologique au cours du métabolisme de l'oxygène, mais en très faible quantité. (**Ahounou, 2018**).

Il existe nombreuses pathologies associées au stress oxydatif y compris Alzheimer, Parkinson, l'athérosclérose, l'hypertrophie cardiaque, le diabète, l'insuffisance cardiaque l'hypertension, et certains cancers ou encore le vieillissement des organes (**Qinghua et al., 2016**). A l'aide des antioxydants, l'organisme se protège contre le stress oxydatif, ils agissent comme des capteurs de radicaux libres on distingue deux types : les antioxydants exogènes (vitamines A, C, E, B2, B3 et B9, zinc, sélénium, polyphénols) et antioxydants endogènes (la bilirubine, le glutathion, la mélanine, l'acide urique l'albumine, β -carotène; les enzymes antioxydants tel que le super oxyde dismutase (SOD), la NADPH oxydas (**Rousseau, 2020**).

La spiruline est une source exceptionnelle d'antioxydants; Une tonne de fruits contient la quantité d'antioxydants contenus dans un kilogramme de spiruline ! (**Manet, 2016**) elle est riche en phycocyanine, β -carotène, vitamine A, C, E, enzyme SOD, acide γ -linoléique, sélénium, méthionine ... etc. De plus, les activités de la plupart des antioxydants endogènes ont augmenté après l'administration de la spiruline (**Moor et al., 2020**).

III.1.2 Activité Anti-microbienne

Un grand nombre de produits et/ou d'extraits extracellulaires d'algues ont été signalés comme agents anti-microbiens (anti-viraux, anti-bactériens, anti-fongiques, anti-protazoaires), bien que la structure et l'identité détaillée de la substance active les constituants de bon nombre d'entre eux ne sont pas encore connus (**Borowitzka, 1992**). Parmi les microalgues, la spiruline gagne de plus en plus la considération en tant qu'agent antimicrobien naturel (**Shao et al., 2019**).

Chapitre III Activités Biologiques d'*Arthrospira platensis*

Certaines études préliminaires in vitro d'extraits de spiruline sur quelques bactéries pathogènes *Escherichia coli* (*E.coli*) et *Staphylococcus aureus* (*S.aureus*) ont permis d'observer un potentiel antimicrobien efficace (**Qureshi et Hunter, 1995**).

Ce résultat, certifie la possession de la cyanobactérie d'un mécanisme de défense pour lutter contre les bactéries pathogènes et donc une perspective de mettre au point ou de développer un antibiotique (agent antimicrobien) à base de plante, sûr et prometteur avec moins d'effets secondaires pouvant substituer à des médicaments synthétiques (**Alghanayem, 2017**).

Les résultats des différents extraits de spiruline sur diverses bactéries n'ont pas permis à ce jour de définir une substance antibactérienne particulière mais un spectre d'action qui serait un support pour démontrer le potentiel de cette activité sur quelques germes pathogènes (**Kaushik et Chauhan, 2008**).

III.1.3 Activité Anti-inflammatoire

Le système immunitaire est le principal médiateur de l'inflammation corporelle les cytokines jouent un rôle central dans l'initiation de l'inflammation. L'activation du système immunitaire entraîne la production de cytokines pro-inflammatoires, telles que le TNF- α , l'IL-1B et l'IL-6 (**Goulambasse, 2018**).

La richesse de la spiruline en protéine et en acide gras notamment les oméga 3 et 6 qui ne peuvent pas synthétisés par l'organisme lui donne un intérêt biologique particulier puisque cet acide gras est un précurseur des prostaglandines, molécules ayant une activité anti-inflammatoire et immunostimulante au sein de l'organisme (**Charpy et al., 2008**).

Jusqu'à présent, les avantages de la spiruline dans la construction de l'immunité et l'amélioration de la résistance à la réponse inflammatoire sont bien documentés. Il est bien connu que la COX-2 est l'isoforme principale impliquée dans l'inflammation et l'induction de la COX-2 est responsable de la production de prostaglandines sur le site de l'inflammation. (**Goulambasse, 2018**).

Dans un test de sang total chez l'homme, la phycocyanine inhibait significativement la COX-2 avec une valeur de C150 de 80 nm. L'activité anti-inflammatoire de la phycocyanine pourrait être due en partie à son effet inhibiteur sélectif sur la COX-2, bien que sa capacité à piéger efficacement les radicaux libres et à inhiber efficacement la peroxydation lipidique pourrait également être impliquée.

Chapitre III Activités Biologiques d'*Arthrospira platensis*

Cette pigment assez rare dans la nature. Elle se trouve avec un pourcentage d'environ 10 à 11% en moyenne dans la spiruline.

Ce composant inhibe la formation de cytokines pro-inflammatoires telles que TNF- α (Tumor Necrosis Factors α), supprimant l'expression de la cyclooxygénase 2 (COX-2), médiateur principal de l'inflammation, et diminuant la production de prostaglandine E, et stimulerait également la production des globules rouges et des globules blancs (**Goulambasse, 2018**).

Il y a un autre composant présent dans la spiruline serait à l'origine de l'activité anti-inflammatoire, le β -carotène ou la provitamine A. Il aurait pour impact l'inhibition de l'expression de COX-2 ainsi que de TNF- α et IL-1 β (Interleukine 1 β) et la production de prostaglandine E (**Charlemagne, 2008**).

Elle augmente l'activation des macrophages, l'activité des cellules T et l'activité des cellules naturellement destructrices (NK). Ce processus permettrait la libération des interférons gamma (IFN - γ), ce qui peut éventuellement rendre les virus inactifs (**Charpy et al., 2008**).

III.1.4 Activités Anti-cancéreuse

De nombreuses formes de cancer résultent de dommages à l'ADN cellulaire, entraînant une croissance cellulaire incontrôlée. Les endonucléases cellulaires réparent fréquemment l'ADN endommagé afin de maintenir la cellule en vie et en bonne santé. La désactivation de ces enzymes par oxydation, rayonnement ou toxines entraîne des erreurs dans l'ADN et conduit éventuellement au développement d'un cancer (**Shao et al., 2019**).

De nombreuses études ont confirmé les activités anticancéreuses des extraits de Spiruline, seuls ou en combinaison avec d'autres composés. Des études in vitro ont suggéré la composition unique des polysaccharides de spiruline qui améliorent l'activité enzymatique et la réparation de l'ADN. Il y a des décennies, Schwartz et Shklar (1987) ont étudié l'effet d'extraits de microalgue sur le carcinome épidermoïde induit des poches buccales de hamster chez 20 animaux. Les résultats ont montré que l'extrait de spiruline (phycotène) entraînait une régression totale de la tumeur chez 30 % des animaux traités; tandis que le β -carotène et la canthaxanthine ont entraîné une régression totale de la tumeur chez 20 % et 15 % des animaux traités, respectivement (**Shao et al., 2019**).

Cela a confirmé l'activité anticancéreuse plus élevée de l'extrait de spiruline que le β -carotène ou la canthaxanthine. Un an plus tard, Schwartz et *al.*, (1988) ont rapporté que l'activité anticancéreuse de l'extrait de spiruline était attribuée à la stimulation de la réponse immunitaire pour détruire sélectivement les petits foyers de développement de cellules malignes sans impact négatif sur les cellules normales. Liu et *al.*, (2000) ont découvert que 160 mg/L de c-phycoyanine de *S. platensis* inhibaient de manière significative la croissance *in vitro* des cellules de leucémie humaine K562 alors que le nombre de colonies passait de 4,8 dans le contrôle à 2,3 dans les cellules traitées à la phycoyanine après 12 jours d'incubation.

De plus, Subhashini et *al.*, (2004) ont rapporté que le traitement avec 50 μ m de c-phycoyanine hautement purifiée de *S. platensis* jusqu'à 48 h entraîne l'inhibition de la prolifération des cellules K562 de 49% (Shao et *al.*, 2019)

Simsek et *al.* (2008) ont suggéré que la supplémentation en spiruline *platensis* est utile dans le traitement de l'anémie et de la leucémie induites par la toxicité du plomb et du cadmium. De plus, Choi et *al.*, (2013) ont étudié l'activité anticancéreuse du cyanophyte marin *S. maxima* cultivé en eau de mer profonde et ont rapporté une suppression efficace de la surexpression du gène Bcl2 dans les cellules A549 conduisant à l'inhibition de diverses cellules cancéreuses humaines (Shao et *al.*, 2019).

Dans d'autres études et analyses d'experts, on a affirmé que le bêta-carotène, un des antioxydants présent dans la spiruline, pourrait inverser le processus cancéreux et inhiber le déploiement des cellules cancérogènes. Une de ces analyses confirmatives du résultat fut élaborée avec des personnes qui avaient une leucoplasie buccale (état précancéreux de la bouche). Ces derniers, ont montré après une prise quotidienne d'1g de spiruline pendant un an une amélioration de leur état et réussirent à arrêter le développement de la pathologie.

La phycoyanine intervient aussi dans cette activité en s'attaquant aux radicaux libres responsables du cancer (Vidalo, 2015).

II.1.5 Activité Anti-virale

Les propriétés antivirales sont observées à de faibles concentrations ou la spiruline a réduit la réplication virale tout en bloquant la réplication à des concentrations élevées. L'extrait soluble dans l'eau de spiruline a conduit à l'isolement d'un polysaccharide sulfaté appelé calcium spirulan (Ca-SP) comme antiviral standard inhiber la réplication de plusieurs virus enveloppés, notamment le virus Herpès simplex de type 1, le cytomégalovirus humain, le

Chapitre III Activités Biologiques d'*Arthrospira platensis*

virus de la rougeole, le virus des oreillons, le virus de la grippe A et le VIH-1 (Jung et al., 2019).

Un groupe de scientifiques de la faculté de médecine d'Harvard a montré que de faibles quantités d'extraits de spiruline et notamment de son composant le calcium-48 spirulan, ont une action antivirale prometteuse in vitro permettant de réduire la réplication virale du VIH et à de plus fortes concentrations interrompent complètement sa réplication. (Hayashi et al., 1996).

La spiruline empêche la pénétration du virus dans la membrane cellulaire qui ne peut donc plus se répliquer. Le virus reste dans la circulation extracellulaire et est éliminé par les défenses immunitaires. De plus, une étude comparative entre le Ca-spirulan et le sulfate de dextrane, un anti-HIV connu, a montré in vitro une activité 4 à 5 fois plus élevée pour le Ca-spirulan car il cible l'absorption, la pénétration et certaines étapes de la réplication. Le Ca-Sp montre une activité anti-VIH et anti-HSV-1 (Hayashi et al., 1996).

Autres chercheurs ont tenté de rechercher des agents antiviraux efficaces et peu coûteux à partir de sources naturelles.

Gerber et al., (1958) ont rapporté que les polysaccharides d'algues présentaient une activité antivirale contre les oreillons et le virus de la grippe B (Ghaeni et Roomiani, 2016).

De plus, Hayashi et al., (1993) ont rapporté l'activité anti HSV-1 d'extraits aqueux de *S.platensis* (Regunathan et Wesley, 2016).

III.1.6 Activité Anti-hypercholestérolémiant

Il existe une corrélation statistique entre l'excès de cholestérol et l'infarctus, la thrombose, l'artérite et les maladies cardio-vasculaires qui sont la première cause de mortalité en occident. Les causes sont multiples mais se conjuguent comme une alimentation trop riche, alimentation trop sucrée, trop salée, le stress, l'alcool, le tabac, le manque d'exercice physique, ... Aux alentours de la quarantaine, le cholestérol en excès dans le sang se dépose sur les parois interne des artères: c'est l'athérosclérose. Dans un second temps, les vaisseaux se durcissent, c'est ce qu'on appelle l'artériosclérose. Ce qui va entraîner une diminution du diamètre des artères qui parfois, se bouchent totalement. Un coronaire qui se bouche donne l'infarctus (Toudert et Bouzidi, 2020).

Avec son fort taux d'acide gamma-linolénique (AGL), la spiruline est naturellement capable de faire baisser le taux de cholestérol sanguin de façon significative. Pour rappel,

Chapitre III Activités Biologiques d'*Arthrospira platensis*

l'AGL est classé comme un acide gras essentiel, c'est à-dire que le corps en a besoin mais ne peut pas en synthétiser, et doit donc être apporté par l'alimentation. L'AGL facilite la production d'une très importante substance appelée prostaglandine E1 (PGE1). Celle-ci aide à prévenir les crises cardiaques et les accidents vasculaires cérébraux, elle aide également à éliminer l'excès de liquide, à améliorer la circulation sanguine, à ralentir la production du cholestérol (Toudert et Bouzidi, 2020). Les acides gras oméga-3 et oméga-6 de la spiruline préviendraient l'accumulation de cholestérol dans l'organisme (Charpy et al.,2008).

La spiruline contient de la vitamine B3 encore appelée acide nicotinique qui est une vitamine hypocholestérolémiant (Manet, 2016).

III.1.7Autres effets

- **Effets contre le diabète, l'obésité et la circulation sanguin**

D'après Takai et al. (1991), la fraction soluble dans l'eau de la Spiruline a la propriété de diminuer le taux de glucose dans le sérum. Par ailleurs, Becker et al. ont montré en 1986 qu'une supplémentation en Spiruline de 2,8 g 3 fois par jour pendant 4 semaines entraînait une réduction du poids corporel chez les obèses. Iwata et al., (1990) ont remarqué une suppression de l'hypertension chez les rats, suite à un apport de Spiruline. Cheng-Wu Z et al. ont montré que la phycocyanine et les polysaccharides de la spiruline possédaient une activité érythropoïétine (Belay, 2002).

DEUXIEME PARTIE

Etude expérimentale

CHAPITRE I

Matériel et Méthodes

I. Matériel

I.1. Matériel Biologie

Paillette de spiruline (BEHTAM), prélevé à partir de deux fermes de culture, spiruline X1 et spiruline X2 commercialisées sous forme de paillette utilisé dans cette étude pour évaluer leur valeur nutritionnelle.



(a)



(b)

Figure 09:(a) spiruline X2, (b) spiruline X1

I.2. Matériel non Biologique

Tous le matériel non biologique utilisé dans cette étude tel que (Appareillage, verreries et instruments) sont représentés dans le tableau (06).

Tableau 06: Matériel utilisé

Appareillage		
Autoclave	Bain marie	pH mètre
Etuve de séchage	Bec bunsen	Spectrophotomètre
Plaque chauffante	Balance analytique	Soxhlet
Verreries et instruments		
Béchers	Papier aluminium	Tubes à essai + support
Coton	Erlenmeyer	Flacons
Eprouvette graduée	Entonnoir	Cristallisaoire
Verre de montre	Mortier et pilon	Pissette
Pipette graduée	Papier filtre	Boite de pétri
Lames	Spatule	

II. Méthodes

II.1. Analyses des valeurs nutritionnelles de spiruline

II.1.1. Teneur en protéine

Méthode de Kjeldahl (NF V 04-211, 1971 AFNOR, 1999)

- **Principe:**

Minéralisation d'une prise d'essai par l'acide sulfurique en présence d'un catalyseur, alcalinisation des produits de la réaction, distillation de l'ammoniac libéré qui recueilli dans une solution d'acide borique, est titré par une solution d'acide sulfurique ou chlorhydrique. Détermination de la teneur en azote, calcule de la teneur en protéines en multipliant par le facteur conventionnel de 6,25.

- **Mode opératoire:**

Prise d'essai : Peser 1g de l'échantillon sur un morceau de papier ou un récipient adapté.

a. Minéralisation: Introduire dans le matras:

- 1g de l'échantillon et éviter les contacts avec les parois.
- Le catalyseur (6g de sulfate de potassium, 1g de sulfate de cuivre) : 1g du mélange
- 1g de sélénium.
- 25 ml d'acide sulfurique concentré 96%.
- Placer le matras sur le dispositif de chauffage, chauffer d'abord doucement (pour éviter la montée de la mousse).
- Faire ensuite, bouillir vigoureusement jusqu'à limpidité de la solution (350°C), en agitant de temps à autre le matras.
- Laisser refroidir.

b. Distillation de l'ammoniac: Verser dans le matras refroidi contenant la solution limpide obtenue:

- 50 ml d'eau distillée et laisser refroidir.
- Adapter le tube au distillateur.
- Réglé le distillateur pour ajouté 10 ml l'acide borique 4% dans le flacon de réception qui doit être de taille suffisante pour recevoir plus de l'acide borique, le distillat et ajouté quelque gouttes d'indicateur coloré.

- 50 ml d'hydroxyde de sodium à 32% est introduit pour alcaliniser le contenu du tube, la distillation est procédé dans les conditions prévues de l'appareil utilisé.
- Après 4 minutes de distillation, il y aura virage de la couleur du rouge au bleu verdâtre.

c. Titrage: Il faut titrer rapidement l'ammoniac dans la solution de la distillation, avec la solution d'acide chlorhydrique à 0,25N, la lecture du volume de ce dernier se fait au moment du virage de la couleur au rose.

La teneur en protéines exprimée en pourcentage rapportée à la matière sèche.

Expression de résultat:

$$P = \frac{(v_1 - v_0) \times T \times 14 \times 100}{m \times D \times 1000} \times 6,25$$

Soit :

m: La masse de la prise d'essai en grammes.

v₁: Volume (ml) d'acide chlorhydrique utilisé dans le titrage de l'échantillon.

v₀: Volume (ml) d'acide chlorhydrique utilisé dans l'essai à blanc.

T:Normalité de HCL utilisé

14: Indice d'azote

6,25: Facteur de conversion

II.1.2. Teneur en carbohydate

Méthode phénol-acide sulfurique: (Dubois et al., 1956)

- **Principe:**

Dans un milieu acide et à chaud, le glucose se transforme en hydroxy méthyle furfural, qui forme un complexe vert avec le phénol, ce complexe a une absorbance maximale à 490 nm.

- **Mode opératoire :**

- Peser 0,1 g de l'échantillon, ajouter 5 ml d'acide chlorhydrique (HCl) à 2,5 N.
- Hydrolyser le mélange dans un bain marie régler à 100°C pendant 3h.
- Refroidir à température ambiante.
- Neutraliser avec du carbonate de sodium solide, jusqu'à ce que l'effervescence cesse.
- Filtrer la solution si nécessaire, compléter à 100 ml avec de l'eau distillée.

- Prélever 0.3 ml de cette solution dans un tube à essai, compléter le volume dans chaque tube à 1mL avec de l'eau distillée. Ajouter 1 ml d'une solution de phénol (5%), Agiter, puis verser 5 ml d'acide sulfurique concentré (96%), agiter à nouveau.
- Préparer un blanc de la même manière avec 1 ml d'eau distillée.
- Laisser reposer pendant 10 min, puis mettre les tubes à essai au bain-marie à une température entre 25-30°C pendant 20min.
- Après refroidissement, la densité optique est lue à 490 nm contre le blanc de référence.
- Préparation de la courbe d'étalonnage:
- A partir d'une solution mère de glucose 0,1%, prélever 10 ml et les introduire dans une fiole qu'on doit compléter à 100 ml d'eau distillée. De cette solution fille prélever 0,2; 0,4; 0,6 et 0,8 et 1ml présentant respectivement des quantités de 20; 40; 60; 80 et 100ug de sucres dans des tubes à essai puis ajuster à 1ml avec l'eau distillée, additionner 1ml de la solution de phénol à 5% et 5ml d'acide sulfurique concentré (96%) dans les mêmes conditions opératoires utilisées pour l'échantillon.
- Déterminer la concentration en sucres; en se référant à une courbe étalon. La teneur en glucides totaux rapportée à la matière sèche est donnée par la formule suivante:

$$S\% = \frac{x \cdot D \cdot V}{10^5 \cdot P} * 100$$

Soit:

S%:Le pourcentage des sucres totaux

V:Le volume de solution d'extraction

D:La dilution de la solution mère

x:La concentration de l'échantillon

P:Poids en (g) de la prise d'essai

II.1.3. Teneur en lipide

La teneur en lipides a été déterminée par Soxhlet selon la méthode décrite par (**Truzzi et al., 2014**). En utilisant l'hexane comme solvant pour l'extraction des lipides à l'aide d'un évaporateur rotatif. La matière grasse s'accumule dans le ballon jusqu'à ce que l'extraction soit complète, le ballon à été pesé et la teneur en matière grasse déterminée par la différence entre la masse du récipient lipidique et celle du vide. L'appareil utilisé dans cette extraction est du type Soxhlet montré dans figure (10).

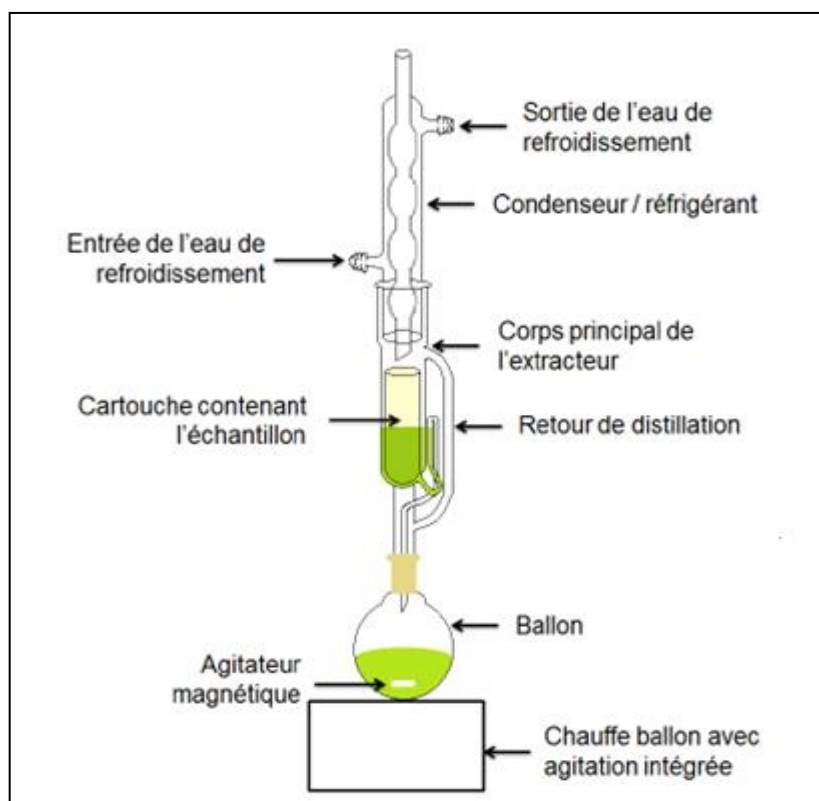


Figure 10: Extracteur Soxhlet

La teneur en matière grasse totale de l'échantillon est calculée ainsi:

$$\text{Matière grasse (\%)} = \frac{M1 - M0}{P} \times 100$$

M0: masse en gramme du récipient vide.

M1: masse en gramme du récipient avec résidu de matière grasse.

P: la masse en gramme de la prise d'essai.

II.1.4. Valeur énergétique

La valeur énergétique de la spiruline a été calculée à partir des valeurs analytiques pour les protéines, les matières grasses, et les glucides à partir d'une quantité de spiruline conditionnée (spiruline en poudre).

Tableau 07: Valeur physiologique des nutriments (Acia, 1997)

Eléments nutritifs	Kcal/g	Kj
- Lipides	9	38
- Protéines	4	17
- Glucides	4	17

1 calorie = 4,184 kilojoules

En utilisant les valeurs d'énergie physiologique moyenne, la valeur énergétique théorique de la spiruline il été déterminée selon l'équations suivante:

$$\text{Valeur énergétique en Kcal} = 4 \text{ glucides} + 4 \text{ protéines} + 9 \text{ lipides}$$

$$E \text{ (Kj)} = 38 \text{ (Kj/g)} * \% \text{ matière grasses} + 17 \text{ (Kj/g)} * \% \text{ Glucides} + 17 \text{ (Kj/g)} * \% \text{ protéine (Seguera, 2008)}$$

II.1.5. Teneur en Fer

Les teneurs en fer ont été déterminées par spectrométrie d'absorption atomique à flamme selon la méthode AOAC (2012).

II.2. Analyses microbiologiques de la spiruline

II.2.1. Préparation de la suspension mère et dilutions décimales

On réalise généralement à partir de la suspension des dilutions successives en progression géométrique à raison de 10, le diluant est en général celui qui a servi à préparer la suspension mère.

Nous introduisons aseptiquement 25g de produit à analyser dans un flacon stérile taré contenant au préalable 225 ml de diluant soit le TSE (Tryptone Sel Eau), puis nous homogénéisons pendant 6 à 8 minutes.

Cette suspension constitue alors la dilution mère qui correspond donc à la dilution 1/10 ou (10^{-1}).

- A partir de la dilution mère nous préparons les dilutions décimales.
- Nous introduirons ensuite aseptiquement à l'aide d'une pipette en verre graduée et stérile, un volume de 1 ml de la dilution mère dans un tube à vis stérile contenant au préalable 9 ml de diluant TSE puis nous homogénéisons et cette dilution est alors au 1/100 ou (10^{-2}).
- Ensuite nous prélevons aseptiquement 1ml de la dilution 1/100 ou (10^{-2}) que nous introduirons dans un tube à vis stérile contenant au préalable 9ml du diluant TSE, puis nous homogénéisons et cette dilution est alors au 1/1000 ou (10^{-3}).

II.2.2. Recherche et dénombrement des germes aérobies mésophiles (GAMT) (AFNOR, NF 08-051, 1991)

- **Principe**

Elle consiste à la mie en contact de ces microorganismes aérobies mésophiles avec un milieu de culture adéquat « Plate Count Agar » (PCA) pour permettre leur croissance et leur développement en vue de les dénombrer sous forme de colonies lenticulaires à 30 ° C .

- **Mode opératoire**

- A partir des dilutions décimales 10^{-3} à 10^{-1} , porter 1 ml dans deux boîtes de Pétri.
- Ajouter environ 20 ml de la gélose PCA (gélose glucosée à l'extrait de levure «Plate Count Agar» fondu et refroidie à $45\pm 1^{\circ}\text{C}$.
- Effectuer des mouvements circulaires et de va et vient en forme de huit pour permettre à l'inoculum de se mélanger à la gélose utilisée.
- laisse solidifier sur paillasse
- Rajouter une deuxième couche de la même gélose pour éviter les contaminations
- Incuber les boîtes couvercles en bas à 30 ° C pendant 72 heures
- Effectuer la lecture chaque jour
- Les colonies des GAMT se présentent sous forme lenticulaire en masse
- Dénombrement: il s'agit de compter toutes les colonies ayant poussé sur les boîtes en tenant compte du facteur suivant:
- Ne dénombrer que les boîtes contenant entre 15 et 300 colonies

Expression des résultats:

$$N = C \times \text{inverse de la dilution}$$

Soit :

N: Nombres de microorganismes par gramme de produit analysé

C: Nombres de colonies de chaque boîte

II.2.3. Dénombrement des coliformes totaux et des coliformes fécaux (NF 08-060 (1996) /ISO 72185)

- **Principe**

Les deux groupes de microorganismes les plus utilisés comme indicateurs de contamination bactérienne sont des coliformes totaux et coliformes fécaux(Desjardins, 1997). Les coliformes se distinguent des autres entérobactéries par leur aptitudes à fermenter le lactose, leurs détections consistent à incuber l'échantillon à 37 C ° pendant 24h à 48h dans le milieu «Violet Red Bile Lactose agar» (VRBL).

- **Mode opératoire**

- A partir des dilutions décimales allant de 10^{-3} à 10^{-1} , porter aseptiquement 1 ml dans deux boîtes de Pétri vide.
- Remplir ensuite chaque boîte avec environ 20 ml de gélose VRBL (gélose lactosée biliée au cristal violet et au rouge neutre), fondue puis refroidie à 45 °C.
- Faire ensuite des mouvements circulaires et de va-et-vient en forme de « 8 » pour permettre à l'inoculum de bien se mélanger à la gélose utilisée.
 - Une série de boîtes sera incubée à 37°C, pendant 24 à 48 h et servira à la recherche de coliformes totaux.
 - L'autre série sera incubée à 44 °C pendant 24 à 48 h et servira à la recherche de Coliformes fécaux.
- Que ce soit à 37 ou à 44 °C, les premières lectures se feront au bout de 24 h et consistent à repérer les petites colonies rouges ayant poussé en masse mais fluorescentes.
- Lecture et dénombrement.
- Il s'agit de compter toutes les colonies ayant poussé sur les boîtes en tenant compte des facteurs de dilutions, de plus:

- Les colonies apparaissent rouge à violettes de 0,5 à 1 mm entourées d'un halo de précipité des sels biliaires.
- Ne dénombrer que les boîtes contenant entre 15 et 300 colonies.
- Multiplier toujours le nombre trouvé par l'inverse de sa dilution.
- Il est impossible de trouver plus de Coliformes fécaux que de Coliformes totaux.

II.2.4. Recherche et dénombrement de *Staphylococcus aureus*

- **principe**

Les *Staphylococcus aureus* sont des germes aéro-anaérobie facultatifs, possédant une catalase sont capable de réduire le tellurite de potassium en tellurite métallique, qui se traduit par un virage du milieu « GIOLITTI CANTONI » (GC) au noir : elles ont la particularité d'utiliser le mannitol présent dans le milieu chapman avec production d'acide, qui se traduit par un virage du rouge de l'indicateur coloré (rouge de phénol) au jaune ; donnant des colonies pigmentées en jaune (**Bougreois et Leveau, 1980**)

- **Mode opératoire**

- Faire fondre un flacon de milieu Chapman et le refroidir à 45°C.
- Couler le milieu dans des boîtes de pétri.
- Laisser solidifier sur paillasse couvercle fermé.
- Transférer à l'aide d'une pipette 1 ml de chaque dilution 10^{-1} et 10^{-3} à la surface de 6 boîtes de pétri.
- Répartir sur toute la surface à l'aide d'un râteau stérile.
- Incuber les boîtes retournées (couvercle en bas) pendant 24 à 48h à 37 °C. Après ce délai, repérer les colonies suspectes à savoir les colonies de taille moyenne, lisses, brillantes, pigmentées en jaune.

II.3. Evaluation nutritionnelle des extrait aqueux de spiruline

II.3.1. Extraction aqueuse

Pour obtenir un extrait brut d'*Arthrospira platensis*, l'extraction se fait par décoction, infusion et macération.

- a. Décoction:** 10 grammes de poudre de spiruline ont été introduits dans 100 ml d'eau distillée puis l'ensemble a été porté à ébullition pour une durée de 20 mn. Le décocté obtenu, après refroidissement, a été filtré par une coton (**Denou et al., 2016**).

- b. Infusion:** 10 grammes de poudre de spiruline ont été versés dans 100 ml d'eau bouillante, après 15 mn l'infusé a été filtré par une coton (**Denou et al., 2016**).
- c. Macération:** 10 grammes de poudre de spiruline ont été macérés dans 100 ml d'eau distillée dans un Erlenmeyer pendant 24 h à la température ambiante. Le macéré obtenu a été ensuite filtré par une coton (**Denou et al., 2016**).
- L'extraction répète trois fois pour épuiser le matériel biologique et récolter le maximum des composés.
 - Tous les extraits obtenus à partir de ces trois étapes, certains restent sous forme d'extrait liquide et l'autre est séché dans l'étuve pour obtenir un extrait sec.

II.3.2. Détermination des rendements d'extraits secs

Le rendement d'extraction correspond au pourcentage du principe actif dissout dans le solvant organique utilisé pour l'extraction. Déterminé à partir du poids de l'extrait sec par rapport au poids de la matière biologique sèche rendue en poudre utilisée pour l'extraction (**Abe et al., 2010**).

Le rendement est calculé selon la formule suivant:

$$R (\%) = [M1 / M0] \times 100$$

R %: Rendement en extraits exprimée en g /100g de matière sèche.

M1:Quantité d'extrait récupérée exprimée en g.

M0:Quantité de la matériel biologique utilisée pour l'extraction exprimée en g (**Abe et al., 2010**)

Les étapes expérimentales d'extraction aqueuse sont représentées par la figure (11) suivants:

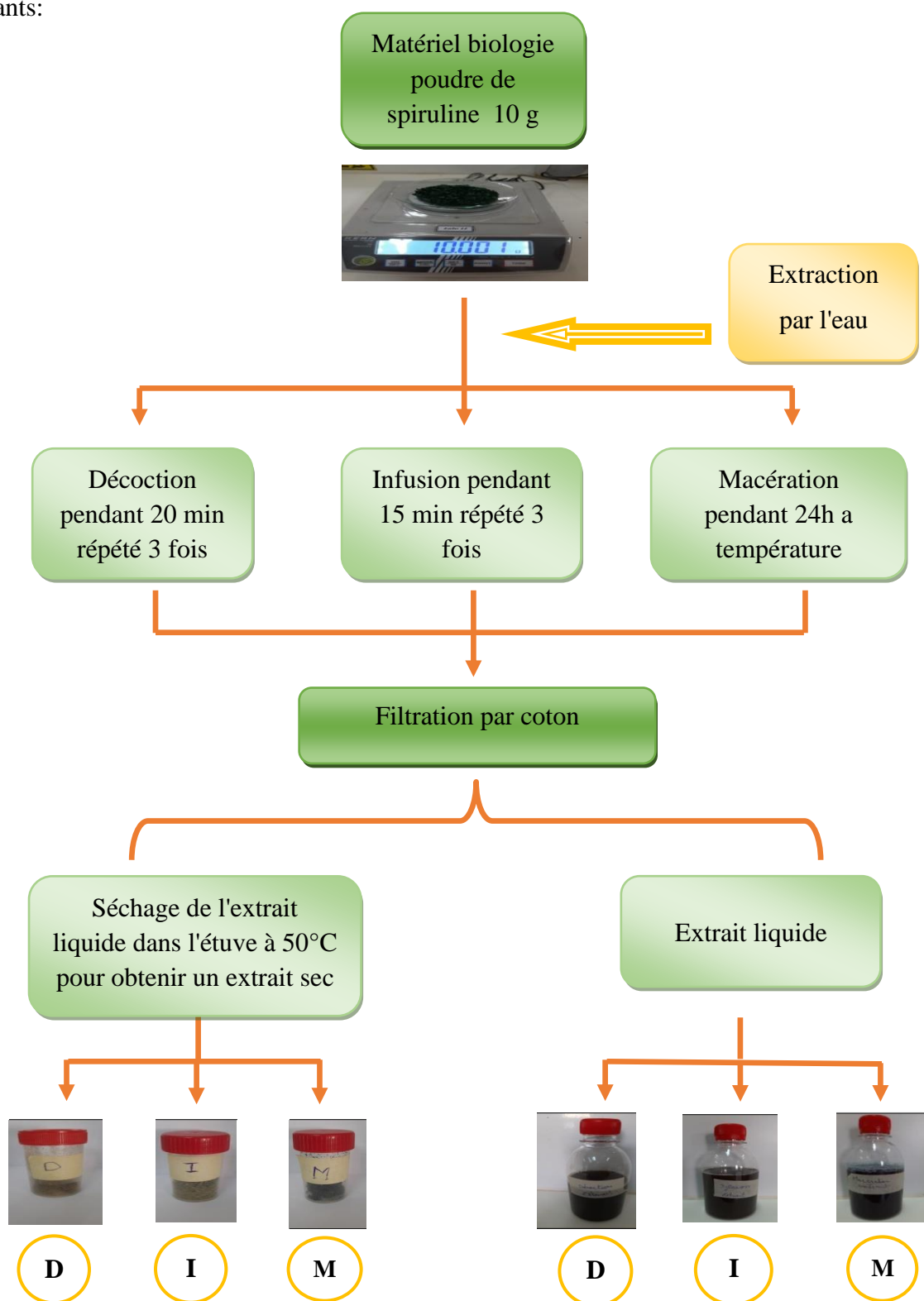


Figure 11: Etapes expérimentales d'extraction aqueuse

CHAPITRE II

Résultats et discussions

I. Résultats et discussions

I.1. Résultats des analyses des valeurs nutritionnelles de spiruline

Les résultats des analyses des valeurs nutritionnelles effectuée sur la biomasse d'*Arthrospira platensis* cultivé en 02 région différent présentent dans les figure (12, 13 et 14) suivant:

I.1.1. Teneur en Protéine, lipide et carbohydate

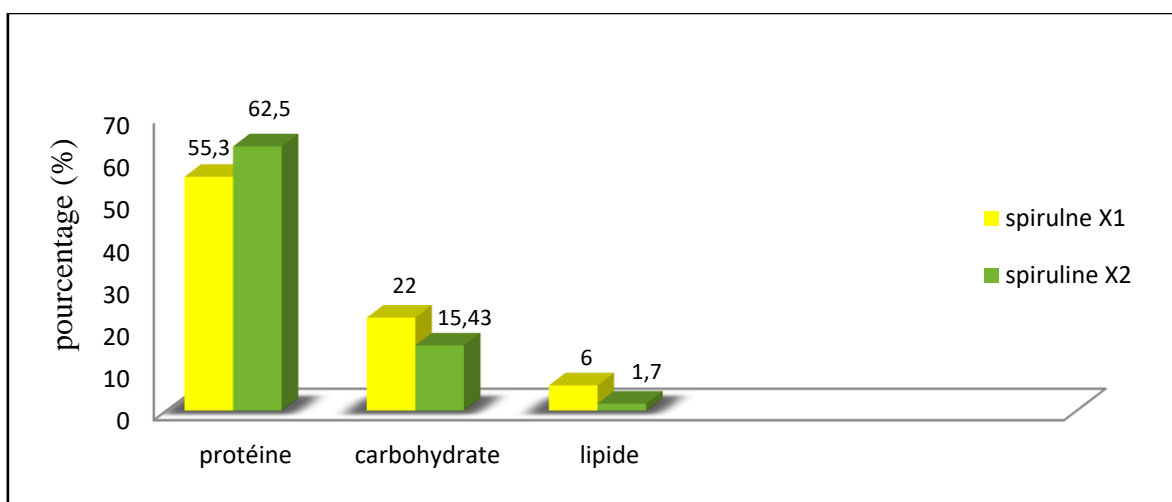


Figure12: Comparaison des valeurs nutritionnelle d'*Arthrospira platensis* cultivée en 02 régions différentes

On observe à partir la courbe des valeurs nutritionnelle de spiruline X1 et spiruline X2, la teneur les plus important est le protéine, suivie le carbohydate puis le lipide qui sont très faibles pour spiruline X2.

Il y a une différence dans la quantité des compositions biochimiques entre les deux échantillons (spiruline X1 et spiruline X2) ; dans la spiruline X1 la teneur de carbohydate et de lipide est supérieure à celles de spiruline X2, alors que la teneur de protéine dans la spiruline X2 est supérieur à celle de spiruline X1.

Il ressort des résultats trouvés que la spiruline est un bon aliment riche en protéine avec de 62,5% pour spiruline X2 et 55,3% pour spiruline X1; Ces valeurs trouvées représentent une grande teneur en protéine.

Selon **Bensehaila et al., (2015)** ont mesuré une teneur en protéines de 60.32%, c'est un taux supérieur à 55,3% et inférieur à 62,5% qui a été observé dans cette étude. la variation

de teneur en protéine de spiruline X1 et spiruline X2 dépend des conditions climatiques et composition nutritionnelle de milieu du culture et des technique de production.

Néanmoins, la teneur en protéine de spiruline étudiée présente une valeur bien supérieure à celle de certaines graines de légumineuses : La teneur en protéines du soja atteint 35% (**Huignard et Glitho, 2011**), celles des lentilles des pois cassés 25%, féverole 25 à 35% (**Larralde et Martinez, 1991**), Pois chiche 21,2 à 26,2% (**Jambunathan, 1991**).

D'autre part, par comparaison avec d'autre source de protéine végétales, elles sont toutes moins riches.

D'après le figure (12) la teneur en carbohydate représente 15,43% pour spiruline X2 et 22% pour spiruline X1. ces valeurs sont similaires à celles obtenues par d'autres chercheurs (**Flaquet et Hurni, 2006, quillet, 1975**).

la teneur en lipide de spiruline X1 (6%) est supérieur à celle de spiruline X2 (1.7%); l'augmentation le taux de lipide au sein de la cellule microalgale et due a leur comportement physiologique vis-à-vis le carence en Azote dans la milieu de culture d'autant la concentration est moins concentrée la cellule microalgale va favorisée de synthétisée de Lipide afin de conservée l'énergie.

Selon **Hudson et Karis (1974)**, Les lipides représentent généralement de 6 à 8% du poids sec de la Spiruline mais ce pourcentage peut atteindre 11%. La composition en lipides totaux se caractérise par un bon équilibre entre acides gras saturés et acides gras polyinsaturés (AGPI). Elle se subdivise en deux fractions: une fraction saponifiable «ou acides gras» (83%) et une fraction insaponifiable (17%).

I.1.2. Valeur énergétique

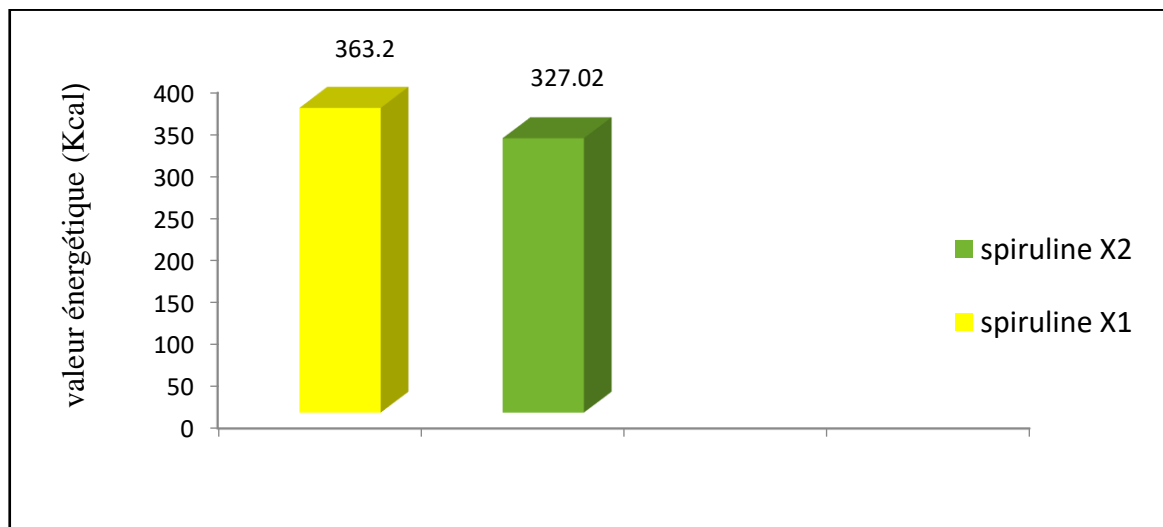


Figure 13: Comparaison entre les valeurs énergétique de spiruline X1 et X2

On observe à travers la courbe précédente que la valeur énergétique est élevée pour la spiruline X1 et spiruline X2.

La valeur énergétique de la spiruline a été calculée à partir des valeurs analytiques pour les protéines, les matières grasses, et les glucides. La valeur énergétique (Kcal) obtenue à partir de cette équation: $4 \text{ glucides} + 4 \text{ protéines} + 9 \text{ lipides}$ sont de 363,2 Kcal pour spiruline X1; 327,02 Kcal pour spiruline X2. On constate que les calories sont proches des deux échantillons.

Selon **Dansou (2002)**, la valeur énergétique de la spiruline a été trouvée à 338 Kcal, la spiruline se rattrape aisément par sa valeur protéique et vitaminique, en complément à d'autres aliments énergétiques tels que les céréales.

En comparant pour 100g avec d'autres sources d'énergie comme la graine de soja, graine sèche (403Kcal). Elle dépasse largement les pommes douces (58Kcal), le lait de vache (64Kcal), le lait maternel (70Kcal), les bananes fraîches (85Kcal), la viande de bœuf séchée salée (203Kcal). Toutefois, sa valeur énergétique est faible par rapport à celle du lait entier en poudre (502Kcal), du chocolat noir sucré (528kcal), de l'huile de coco (878Kcal) (**Razafindrajaona et al., 2006**).

La dose recommandée par l'OMS pour la consommation de spiruline est de 2g jusqu'à 4g par jour, leur valeur énergétique est d'environ 8Kcal.

I.1.3. Teneur en élément de fer

Le fer ayant une importance dans la santé de l'être humaine parce que il portagé contre l'anémie en carence de fer.

Figure (14) représente une comparaison de l'élément de fer entre Spiruline X1 et X2

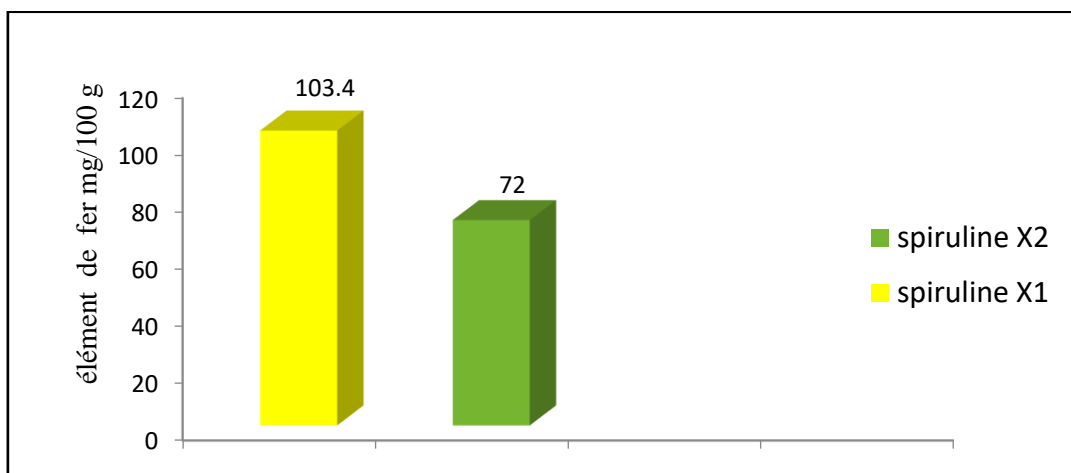


Figure 14: Comparaison l'élément de fer entre spiruline X1 et X2

D'après la courbe précédent, la teneur en fer de spiruline X1 (103.4 mg/100g) est supérieur à celle de spiruline X2 (72 mg/100g).

Selon **Clément (1975)**, qui a indiqué une teneur faible en fer, 53 mg/100g dans l'*Arthrospira platensis* et 59 mg/100g dans l'*Arthrospira maxima*. il est aussi rapporté que le fer de la spiruline est mieux absorbé qui celui de la viande (**Puyfoulhou et al., 2001**).

D'après **Razafindrajaona et al, (2006)**, la valeur nutritionnelle de la spiruline de Madagascar (*spirulina platensis* var. *Toliara*) ont montré que cette variété possède: 7.22% de lipide. 59,3 de protéine, 14 à 24 % de glucides et une énergie calorifique de 387Kca/100g soit 3,87 Kcal/g.

D'après **Dansou (2002)** en menant une étude sur le Développement et la valorisation de la culture de la spiruline (*Spirulina platensis*) au Burkina Faso à montrer que cette espèce avait une composition de 6% de lipides; 57,10% de protéines; 12,77% de glucides et une énergie calorifique de 3,38Kcal/g

En comparant nos résultats avec des autres études, on constate que:

Les composition de la spiruline varient en fonction des conditions climatiques et composition nutritionnelle de milieu du culture et des technique de production.

I.2. Résultats des analyses microbiologiques

La qualité hygiénique de spiruline est une importance pour évaluer sa qualité marchandise. Les résultats des analyses microbiologique sont représentés par les tableau (08)

Tableau 08: Résultats des analyses microbiologiques

Germes recherchées	Résultats des analyses spiruline X2	Résultats des analyses spiruline X1	Normes françaises
Germes aérobies	5×10^7	$2,3 \times 10^6$	<10000
Coliformes totaux	Absence	Absence	-
Coliformes fécaux	Absence	Absence	<10
<i>Staphylococcus aureus</i>	Absence	Absence	<100

Les analyses microbiologiques effectuées sur spiruline X1 et X2 sont conformes avec les normes établies en France. l'absence des germes de contamination fécale (coliformes fécaux, coliformes totaux) et absence totale des germes pathogène (*staphylococcus aureus*) indique que les échantillons ne présente aucun danger pour les consommateurs. cette résultats sont similaires à celles obtenues par **Chine et Kouici, (2017)**. par contre à germes aérobies qui apparu (2.3×10^6) pour spiruline X1 et (5×10^7) pour spiruline X2, la taux élevée de deux germes aérobies indique a faible condition de séchage (la température doit être supérieur 50°C pour déminé la charge microbienne).

La bonne qualité microbiologique de la spiruline sèche est due à la pH alcaline de son milieu de culture qui constitue une barrière contre la pluparts des contaminations; cette bonne qualité indique aussi que notre poudre de spiruline (*Arthrospira platensis*) est fabriquée dans de bonnes conditions d'hygiène.

I.3. Rendements d'extraction

Les rendements de l'extrait a été déterminé par rapport aux matériel biologique sec. Les résultats du rendements % sont représentés dans la figure (15).

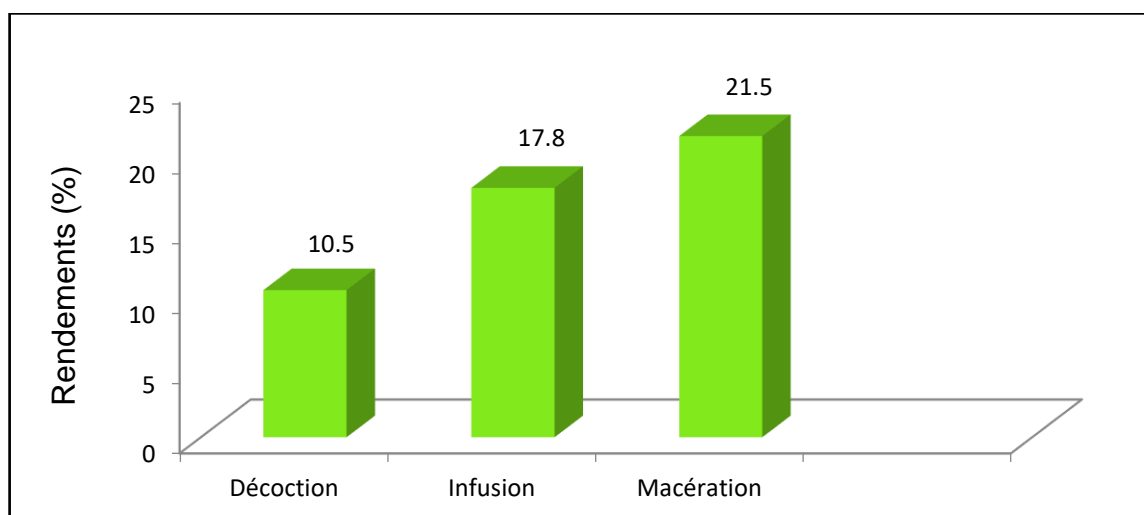


Figure 15: Rendements de l'extrait des trois méthodes (décoction, infusion, macération)

Il ressort à travers l'observation des rendements d'extraction dans le figure (15) que le rendement d'extraction par macération a été élevé (21,5%), suivi du rendement d'extraction par Infusion (17,8%), Alors que l'extraction par décoction a faible rendement (10,5%) dans ces termes.

Statistiquement, on retrouve une grande différence entre les rendements de l'extraction des trois méthodes utilisées, le rendement des extraits par macération se diffère significativement à ceux par décoction ou Infusion. Cette différence est due au temps d'extraction qui est long dans le cas de la macération (24 heures) par rapport aux autres méthodes. Cette résultat est correspondant les travaux de recherche de **Mahmoudi et al., (2013)** sur l'étude d'Artichaut et similaire à celle de **Konkon et al., (2006)** lors de l'étude de l'identification des groupes de constituants chimiques présentant un intérêt pharmacologique, ils ont testé trois modes d'extraction à savoir la décoction, l'infusion et la macération. Ils ont trouvé que la méthode d'extraction par décoction du point de vu quantitative, est aussi efficace que les autres méthodes d'extraction (macération et infusion) (**Bohi et al., 2018**).

D'après l'étude comparative des trois méthodes d'extraction des flavonoïdes totaux à partir des feuilles de plantes médicinales: *Azadirachta indica*, le rendement de l'extrait de cette plante a été trouvé: décoction avec un taux d'extraction 16,30 %, suivi de la macération avec 15,10 % et de l'infusion avec 14,30 %. Par rapport aux résultats de notre étude, nous constatons qu'ils diffèrent en raison de nombreux paramètres tels que: le solvant, le pH, la température, le temps d'extraction et la composition de l'échantillon (**Quy Diem Do et al, 2014**).

CONCLUSION

Conclusion

Conclusion

La spiruline est un cyanobactérie contient une source complète de protéines, vitamines, minéraux et autres nutriments ainsi que ses propriétés anti-inflammatoires et antioxydants. Découvert par des scientifiques, il fait l'objet d'une attention croissante en raison de sa haute valeur nutritionnelle .

Dans cette étude menée sur la spiruline X1 et X2, nous avons constaté qu'elle contient des valeurs nutritionnelles importante, le composant le plus important est le protéine (62.5% et 55.3%), suivie le glucides (22% et 15.43%) puis le lipide (6% et 1.7%). les composition biochimique des deux spiruline (X1 et X2) varie selon les conditions climatiques, les composition nutritionnelle de milieu du culture et des technique de production.

Les résultats des analyses microbiologiques ont prouvé que la spiruline ne présent aucun danger pour les consommateurs, indiqué par l'absence des germes : coliformes fécaux et coliformes totaux et *Staphylococcus aureus*, alors qu'il a donné un résultat (5×10^7) et ($2,3 \times 10^6$) avec des germes aérobies .

Le rendement d'extraction dépend de la matériel biologique sec, car les résultats de notre étude ont prouvé que le rendement des extraits par macération se diffère significativement à ceux par décoction ou infusion. Certaines études ont indiqué que cette différence est due au temps de l'extraction qui est long dans le cas de la macération (24 heures). d'après des résultats d'autres études, il a été constaté que la différence les rendements d'extraction est due aux plusieurs facteurs : solution d'extraction, pH, température, période d'extraction et composants de l'échantillon.

En peut conclure que la spiruline en Algérie est riche en nutriments : protéine , carbohydrate , lipide , fer , et la meilleure méthode d'extraction aqueuse est la macération .

Au vu des résultats obtenus, notre travail reste préliminaire, et il semble qu'il soit très utile de poursuivre cette étude tout en abordant dans le futur différents axes afin d'approfondir la recherche scientifique et technologique. C'est dans cette optique que nous proposons quelques perspectives et recommandations :

- Sensibiliser et encourager les investisseurs à miser sur la culture de spiruline afin de la généraliser et qu'elle soit disponible en quantité suffisante pour subvenir aux besoins de l'industrie agroalimentaire.

Conclusion

- La consommation de spiruline est recommandée contre la malnutrition, en particulier chez les enfants et elle est également recommandée pour le traitement de l'anémie a cause de carence de fer.

- Enrichir les produits alimentaires en spiruline pour augmenter leur stabilité oxydative et augmenter leur valeur énergétique et nutritionnelle.

RÉFÉRENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

Références bibliographiques

A

- Abe, E., Delye, S.G., Alvarezl, J.C.(2010). Extraction liquide-liquide : théorie applications, difficultés Liquid-liquid extraction: theory, applications and difficulties *Annales de Toxicologie Analytique*, 22(2), 51- 59.
- Ahounou, M.N.(2018).La SPIRULINE : un complément alimentaire en conseil à l'officine. Enquête d'utilisation. (Doctoral dissertation, Université de Rouen).
- Ali, S.K., Saleh, A.M.(2012). Spirulin – An overview. *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, 4(3), 9-15.
- Al-ghanayem, A.A.(2017). Antimicrobial activity of *Spirulina platensis* extracts against certain pathogenic bacteria and fungi. *Advances in Bioresearch*, 8(6),96-101.
- Andreani C.G.(2012). Algues et Cyanobactéries, Cours Dumenat Phyto-Aromathérapie, Faculté de Médecine Paris XIII, 8- 9.
- AOAC (Association of Official Agricultural Chemists).(2012). *Official methods of analysis chemists*. 19 the dn; (AOAC Arlington), Virginia, USA.
- Anvar, A.A., Nowruzi, B.(2021). Bioactive Properties of *Spirulina*. *Microbiale Bioactives*, 4(1), 134-142.
- 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

B

- Barry, M .,Ouedraogo, M ., Sourabie, S ., Guissou, I.P.(2014). Intérêt thérapeutique de la spiruline chez l'homme: Revue général. *International journal of Biological and Chemical Sciences* , 8(6), 2740-2749 . doi : [10.4314/ijbcs.v8i6.33](https://doi.org/10.4314/ijbcs.v8i6.33)
- Barth., Leo.(2019). Le Guide Complet de la Spiruline, Article scientifique, <https://naturalathleteclub.com/blog/savoir-spiruline-bienfaits> p12.
- Belay, A . (2002). Mass Culture of *Spirulina* Outdoors – The Earthrise Fram Experience. In A, Vonshak (Ed.). *Spirulina platensis (Arthrospira) : Physiology, Cell – biology and Biotechnology (pp 252)* . London , UK : Taylor & Francis.

Références bibliographiques

- Bellahcen, T.O., Bouchabchoub, A., Massoui, M., El Yachioui, M. (2013). Culture et Production de *Spirulina platensis* dans les Eaux Usées Domestiques. *Larhyss Journal*, 14, 107-122.
- Bensehaila, S., Doumandji, A., Boutekrabt, L., Manafikhi, H., Peluso, I., Bensehaila, K., kouache, A., Bensehaila, A. (2015). The nutritional quality of *spirulina platensis* of Tamenrasset, Algeria. *Afr. J. Biotechnol*, 14(19), 1649-1654.
- Bohi, P.S.G., Adima, A.A., Niamké, F.B., N'Guessan, J.D. (2018). Etude comparative de trois méthodes d'extraction des flavonoïdes totaux à partir des feuilles de plantes médicinales : *Azadirachta indica* et *Psidium guajava*. *chimie*, 50-58.
- Bourgeois, C.M., Leveau, J.Y. (1980). Technique d'analyse et de contrôle dans les industries agroalimentaires. Contrôle microbiologique. Tome 3, Paris, technique et documentation Lavoisier.
- Borowitzka, M.A. (1992). Algal biotechnology products and processes matching science and economics. *Journal of applied phycology*, 4(3), 267-279.

C

- Charlemagne Déborah. (2008). La spiruline: aliment santé ? Mémoire DIU Alimentation Santé et Micronutrition de la faculté de pharmacie de Dijon. P11.
- Charpy, L., Langlade, M.J., Alliod, R. (2008). La Spiruline peut-elle être un atout pour la santé et le développement en Afrique? . Marseille : IRD
- Chine, Y., Kouici, M. (2017). Evaluation de l'activité antimicrobienne et hypocholestérolémiante de la spiruline (*Arthrospira platensis*), Mémoire de Master, Université de Blida 1, Faculté des sciences de la Nature et de la Vie.
- Ciferri, O. (1983). *Spirulina*, the Edible Microorganism. *Microbiological Review* 47(4), 551-578. doi : <https://dx.doi.org/10.1128%2Fmr.47.4.551-578.1983>.
- Clark, M.A., Choi, J., Douglas, M. (2018). *Biology 2e*.
- Clément, G. (1975). Production et Constituants Caractéristiques des Algues "*Spirulina platensis* et *Maxima*". *Annales de la nutrition et de l'alimentation*, 29(6), 477-488.
- Clément-Larosière, B. (2012). Etude de la croissance de *Chlorella vulgaris* en photobioréacteur batch et continu, en présence de concentrations élevées de CO₂. Thèse pour l'obtention du Grade de Docteur, École Centrale des Arts et Manufactures « École Centrale Paris ».

Références bibliographiques

- Cohen, Zvi . (2002). The Chemicals of Spirulina. In A, Vonshak (Ed.) *.Spirulina platensis (Arthrospira) : Physiology, Cell-biology and Biotechnology.*(pp. 252) . London, Uk : Taylor & Francis.

D

- Dansou, D.K. (2002). Développement et valorisation de la culture de la spiruline (*Spirulina platensis*) au Burkina Faso. Mémoire de Diplôme d'Etudes Supérieures Spécialisées (DESS), Université de Ouagadougou, 74 p.
- Debleds, J.P .(2015) . *La Parallaxe de Mercator* .
- Demisu, D.G., Benti, B.D. (2018).Applications of *Arthrospira platensis* as an Alternative Source of Food, Maintaining Nutritional Security and Awareness Creation; there by Reducing Problems of Malnutrition in the Society. *World News Of Natural Sciences,1*(8), 8.
- Denou, A., Koudouvo, K., Haidara, M., Togola, A., Sanogo,R., Essien, K...Gbeassor, M.(2016). Activité analgésique de quatre plantes utilisées dans la prise en charge traditionnelle du paludisme au Mali et au Togo. *International Journal of Biological and Chemical Science, 10*(3), 1342-1349 .
- Doudou, M.H .,Degbey, H ., Daouda, H ., Leveque, A ., Donnen, P ., Hennart, P ., Wilmet, M.D .(2008). Supplémentation en spiruline dans le cadre de la réhabilitation nutritionnelle: revue systématique *.Revue d'épidémiologie et de Santé Publique ,56* , 425-431 . Elsevier Masson France.
- Dubois, M., Gilles, K.A., Hamilton, J.K., Pebers, P.A., Smith, F.(1956). Colorimetric method for determination of sugar and relayed substances. *Analytical Chemistry, 28*, 350-356.

F

- Flaquet, J .,Hurni, J.P . (2006). *Spiruline Aspects Nutritionnels* .Antenna Technologies.
- Fleurence, J. (2021). *Les Microalgues de l'aliment du future à l'usine cellulaire*. ISTE Editions : UK.
- Fox , R.D . (1999). *la Spiruline , Technique Pratique et Promesse* .Edisud.
- 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

Références bibliographiques

in Cultivation Methods, Genetics, and Application in Medicine. *Frontiers in Microbiology*, 8, 2541 . <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02541>

G

- Gael, B., Bruno, S.J. (2014). Microalgues: de petits végétaux aux grandes promesses ! *Biofutur*, (360), 28-31.
- Galiana, D ., Le Rox, C ., Monchâtre, I . (2015). *la gestion de vivant et des ressources*. educagri editions.
- Ghaeni, M ., Roomiani, L . (2016). Review for Application and Medicine Effects of *Spirulina* ,*Spirulina platensis* Microalgae . *Journal of Advanced Agricultural Technologies* , 3(2) , 114-117.
- Goulambasse, T. R. (2018). La Spiruline : Activités Thérapeutiques et son Intérêt dans la Lutte contre la Malnutrition à Madagascar, Thèse pour le diplôme d'état de Docteur en Pharmacie, université de Lille, p46.

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* , 1034 , 33.
- Hajati, H ., Zaghari, M . (2019).*Spirulina Platensis in Poultry Nutrition* .Newcastle upon Tyne, UK : Cambridge Scholars Publishing.
- 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.
- 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 ResHum Retroviruses*, 12: 1463-71.
- Hug, C ., Von der Weid, D .(2011). *la spiruline dans la lutte contre la malnutrition*. Antenna Technologies : Switzerland.
- Huignard, J., Glietho, I.A., Monge, J.P., Regnault-Roger, C., Coord. (2011). Insectes ravageurs des graines de légumineuses : Biologie des Bruchinae et lutte raisonnée en

Références bibliographiques

Afrique. In J, Huignard., I.A, Glitho .*les légumineuses alimentaires en Afrique* (154 pp).France.

J

- Jambunathan, R. (1991). Uses of Tropical Grain Legumes.11-15.
- Jourdan, J.P. (2012). *Cultivez votre spiruline. Manuel de culture artisanale* . Publication Antenna Technologies.
- Jung, F., Krüger-Genge, A., Waldeck,P., Küpper,J.H. (2019). *Spirulina platensis, a super food?*. *Journal of Cellular Biotechnology*, 5(1), 43–54.

K

- Koru, E . (2012). Earth Food *Spirulina (Arthrospira)* : Production and Quality Standarts . In Y, El-Samragy (Ed.). *Food Additive* (pp . 270) .
- Kaushik, P., Chauhan, A. (2008). In vitro antibacterial activity of laboratory grown culture of *Spirulina platensis*. *Indian Journal of Microbiology*, 48(3), 348-352.
- Konkon, N.G., Simaga, D., Adjoungova, A. (2006). Etude phytochimique de mitragynainermis (willd.) o. ktze (rubiaceae), plante a feuille antidiabétique. *Pharm Méd Trad Afr*,14,73.

L

- Larralde, J., Martinez, J.A .(1991). Nutritional value of faba bean: effects on nutrient utilization, protein turnover and immunity. Departamento de fisiologia animal y nutricion, universldad de Navarrapamplona (spain).
- Leon, A.I ., Matsudo, M.C ., Sato, S ., Carvalho, J.C.M . (2012).*Arthrospira platensis* biomass with high protein content cultivated in continuous process using urea as nitrogen source *Journal of Applied Microbiology*, 112 , 1086-1094.
- Liestianty, D ., Rodianawati, I, Arfah, R.A., Assa, A., Patimah., Sundari6., Muliadi.(2019). Nutritional analysis of *spirulina sp* to promote as super food candidate. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* , 509 , 6.

M

- Madkour, F.F .,Kamil, A.W ., Nasr, H.S . (2012). Production and nutritive value of *Spirulina platensis* in reduced cost media. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, 38 ,51-57.

Références bibliographiques

- 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.
- Manoj, K.K., Rimple., Rajesh, K., Amj, N., Reeta., Harikumar, S.L. (2015). Poly Pharmacological Effects Of Green Blood Therapy: An update. *World Journal of Pharmaceutical and Medical Research*, 10-21.
- Mahmoudi, S., Khali, M., Mahmoudi, N. (2013). Etude de l'extraction des composés phénoliques de différentes parties de la fleur d'artichaut (*cynarascolymus* L.). *Nature & Technologie*, 9, 35-40.
- Manet, A. (2016). La spiruline : Indications Thérapeutiques, Risques Sanitaires et Conseils à l'Officine. Thèse présentée pour l'obtention du titre de Docteur en pharmacie, Diplôme d'état, Université Grenoble Alpes, Faculté de Pharmacie de Grenoble.
- Marzorati, S., Schievano, A., Idàb, A., Verotta, L. (2020). Carotenoids, chlorophylls and phycocyanin from *Spirulina*: supercritical CO₂ and water extraction methods for added value products cascade. *Green Chemistry*, 22, 187-196.
- Mishra, T., Joshi, M., Singh, S., Jain, P., Kaur, R., Ayub, S., Kaur, K. (2013). *Spirulina*: the Beneficial Algae. *International Journal of Applied Microbiology Science*, 2(3), 21-35.
- Moor, V.J.A., Anatole, P.C., Nkeck, J.R., Nya, P.C.B., Mondinde, G.I., Kouanfack, C., ... & Ngogang, J. (2020). *Spirulina platensis* enhances immune status, inflammatory and oxidative markers of HIV patients on antiretroviral therapy in Cameroon.
- Morère, J.L., Pujol, R. (2002). *Dictionnaire raisonné de Biologie* (ed.) : Editions Frison-Roche.

N

- Nicoletti, M. (2016). Microalgae Nutraceuticals. *Foods*, 5(54), 13.

P

- Park, W.S., Kim, H.J., Min Li., Lim, D.H., Kim, J., Kwak, S.S., Kang, C.M., Ferruzzi, M.G., Ahn, M.J. (2018). Two Classes of Pigments, Carotenoids and C-Phycocyanin, in *Spirulina* Powder and Their Antioxidant Activities. *Molecules*, 23, 11.

Références bibliographiques

- Pierlovisi, C. (2008). Composition Chimique de la spiruline. Colloque International sur la Spiruline – Toliara sud-ouest de Madagascar.

Q

- Quillet, M.(1975). Recherches sur les substances glucidiques élaborées par les Spirulines. *Ann. Nutr. Alim.* 29, 553-561.
- Qureshi, M.A., Ali, R.A., Hunter, R. (1995). Proc 44th Western Poultry Disease Conference, Sacramento, California. 117-121.

R

- Ragusa, I ., Nardone, G.N ., Zanatta, S ., Bertin, W ., Amadio, E . (2021) .*Spirulina* for Skin Care: A Bright Bleu Future. *Cosmetics*,8(1), 19. <https://doi.org/10.3390/cosmetics8010007>
- Razafindrajaona, J.M., Rakotozandry, J.N.,Rakotodrainy, R.,Randria, J.N, Ramampihrika, K.D.(2006). Etude de la valeur nutritionnelle de la spiruline de Madagascar (*spirulina platensis* var. Toliara). Terre Malgache. Tany Malagasy.166-188.
- Rousseau, M.(2020).Le rôle des métabolites dérivés de la diète sur la santé cardio-métabolique : la contribution des acides aminés à chaîne ramifiée et despolyphénols. (Mémoire de Maîtrise, université de Laval – Canada).

S

- Sahoo, D ., Seckbach, J . (Eds .). (2015). The Algae World : Cellular Origin, Life in Extreme Habitats and Astrobiology . In D, Sahoo ., J, Seckbach (Eds.) . *Biology of Algae* (pp. 531) .New York , London : Springer.
- Saleh, A.M., Dhar, D.W., Singh, P.K. (2011). Comparative pigment profiles of different *Spirulina* strains. *Research in Biotechnology*,2(2), 67-74.
- Sall, Mg .,Dankoko, B ., Badiane, M ., Ehua, E ., Kuakuwi, N . (1999). La spiruline : une Source Alimentaire A Promouvoir .*Médecine d'Afrique Noire* , 46 (3) , 141.
- Shao, W., Ebaid, R., El-Sheekh, M., Abomohra, A., Eladel, H. (2019). Pharmaceutical applications and consequent environmental impacts of *Spirulina* (*Arthrospira*): An overview. *Grasas Aceites*, 70(1), 292.

Références bibliographiques

- Sguera, S .(2008). *Spirulina platensis* et ses constituants: intérêts nutritionnels et activités thérapeutiques. Thèse de Diplôme d'Etat de Docteur en Pharmacie, Université Henri Poincare - Nancy I.

T

- Tabagari, I .,Kurashvili, M ., Varazi, T ., Adamia, G .,Gigolashvili, G ., Pruidze, M ., Chokheli, L ., Khatisashvili, G ., Niemsdroff, P.F . (2019). Application of *Arthrospira*
- Tebbani, S ., Lopes, F ., Filali, R ., Dumur, D ., Pareau, D. (2014). *Biofixation de CO2 par les microalgues* .London, UK : ISTE Editions.
- Tidjani, A ., Doutoum, A.A ., Aguid, MN ., Bechir, M . (2013). Spirulina : An Effective Dietary Supplement for Malnourished Children in Development Country .In Y, Srivastva (Ed.). *Advances In Food Science And Nutrition* (ed., pp 145).
- TOUDERT, M., BOUZIDI,O.(2020). Intérêt de l'utilisation de la spiruline dans les aliments fonctionnels. Université Akli Mohand Oulhadj – Bouira p 38-39.
- Truzzi, C., Annibaldi, A., Illuminati, S., Finale, C., Scarponi, G. (2014). Determination of proline in honey: comparison between official methods, optimization and validation of the analytical methodology. *Food Chemistry*, 150, 477-481 .
- Tsarahevitra, j . (2005). Adaptation de la Spiruline du Sud de Madagascar a la Culture en Eau de Mer . Mise au Point de Structures de Production a l'Echelle Villageoise .Thèse de Doctorat Es Sciences en Océanologie Appliquée , Université de Toliara.

U

- Unnikrishnan Nair, G.S. (2013). Blue Green Algae: Food for the Future . In M.K, Rana (Ed.). *Vegetables and Their Allied as Protective Food*. (pp. 595). India: Scientific Publishers.

V

- Vidal, J.L .(2015). Spiruline, l'algue bleue de santé et de prévention. p 240

Y

- Yougbare, I. (2007). Impact de la Prise Quotidienne de *Spirulina platensis* sur le Statu Immunobiologique et Nutritionnel des Personnes Vivant avec le Virus de l'Immunodéficience à Burkina Faso, Mémoire pour l'Obtention d'un Diplôme d'Etudes

Références bibliographiques

Approfondies en Biologie Appliquée et Modélisation des Systèmes Biologiques, Université Polytechnique de Bobo Dioulasso, Burkina Faso, p11.


Z

- Zheng, J., Inoguchi, T., Sasaki, S., Maeda, Y., McCarty, M.F., Fujii, M ... Takayanagi, R. (2013). Phycocyanin and phycocyanobilin from *Spirulina platensis* protect against diabetic nephropathy by inhibiting oxidative stress. *the American Physiological Society*, 110-120.

ANNEXES

Annexes :

Annexe 01: Fiche nutritionnelle de la spiruline

Spirulina		Fiche Nutritionnelle				
<i>Teneurs pour 100 g d'algue déshydratée (produit brut)</i>		<i>Version du 14/03/2015</i>				
Paramètres	Unité	Teneur Moyenne	Min	Max	Nb données	
Energie	kJ	1 553				
Energie	kcal	372				
Eau	g	5,9	1,6	11,0	19	
Minéraux	g	7,6	4,4	13,2	12	
Protéines (Nx6.25)	g	60,8	43,3	79,3	49	
Glucides (par différence)	g	17,5				
Fibres Alimentaires	g	2,2	0,1	7,4	8	
Lipides	g	6,0	1,9	9,8	38	
AG saturés	g	2,49	2,49	2,49	1	
AG monoinsaturés	g	0,64	0,64	0,64	1	
AG polyinsaturés	g	1,96	1,96	1,96	1	
Phycocyanine	g	10,0	2,2	25,5	21	
Sodium	mg	618	28	1 448	10	
Magnésium	mg	560	185	1 789	12	
Phosphore	mg	1 041	111	3 671	13	
Potassium	mg	1 360	932	1 789	9	
Calcium	mg	487	61	1 850	14	
Manganèse	mg	4,3	1,7	10,8	9	
Fer	mg	79,7	26,8	169,4	15	
Cuivre	mg	1,3	0,3	2,7	6	
Zinc	mg	5,3	1,2	31,1	11	
Iode	mg	0,0	0,0	0,0	5	
Sélénium	µg	nd				
Chrome	µg	273,0	60,0	580,0	6	
Molybdène	µg	nd				
Vitamine A (eq rétinol)	mg	29,4	2,8	79,1	3	
Beta-carotène	mg	127,1	21,7	178,9	4	
Vitamine D	µg	0,0	0,0	0,0	1	
Vitamine E (eq tocophérols)	mg	10	4	18	5	
Vitamine K ou phytoménadione	µg	760	24	1 497	2	
Vitamine C	mg	11,1	7,5	18,8	4	
Vitamine B1 ou Thiamine	mg	3,4	2,2	5,2	6	
Vitamine B2 ou Riboflavine	mg	3,6	3,1	4,3	6	
Vitamine B3 ou PP ou Niacine	mg	14,4	11,1	22,1	4	
Vitamine B5 ou acide panthothénique	mg	0,90	0,43	1,22	3	
Vitamine B6 ou Pyridoxine	mg	0,4	0,1	0,8	6	
Vitamine B8 ou H ou Biotine	µg	19,0	4,3	37,7	4	
Vitamine B9 ou Folate	µg	59,3	37,7	88,5	5	
Vitamine B12 ou Cobalamines	µg	236,1	13,7	659,0	10	

Elaboré par le CEVA (Centre d'Etude et de Valorisation des Algues), Pleubian, France - www.ceva.fr

Annexes

Annexe 02 : Appareillage



Etuve de séchage



Balance



Bain marie



pH mètre



Agitateur magnétique



Spectrophotomètre