

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة 8 ماي 1945 قالمة

Université 8 Mai 1945 Guelma

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



Mémoire En Vue de l'Obtention du Diplôme de Master

Domaine: Sciences de la Nature et de la Vie

Filière: Sciences alimentaires

Spécialité: Qualité des Produits et Sécurité Alimentaire

Département: Biologie

Thème Intérêt alimentaire et biotechnologique de la spiruline

Présenté par :

Messaoudi Aridj

Saidia Nour El Islam

Devant le Jury composée de :

Président :

Mr. BAALI Salim

MCB.

Université de Guelma

Examineur :

Mme. SOUMATI-SOUIKI Lynda

Pr.

Université de Guelma

Encadreur :

Mr. MERZOUG Abdelghani

MCB

Université de Guelma

Juin 2022

Remerciements

Tout d'abord nous remercions Dieu tout puissant et miséricordieux, qui nous aide et nous donne la patience et le courage durant ces longues années d'étude, et qui nous a donné la force et la Patience d'accomplir ce modeste travail.

A ; Docteur BAALI Salim, nous vous remercions de l'honneur que vous nous avez fait en acceptant de présider notre jury.

Nous tenons à remercier Professeure SOUMATI-SOUIKI Lynda qui nous fait le plaisir de juger ce modeste travail.

Nous tenons à remercier chaleureusement notre encadreur, Docteur MERZOUG Abdelghani, qui nous guidé tout au long de ce travail. Nous le remercions particulièrement pour ses conseils éclairés dans l'orientation des travaux, ses nombreuses idées, ainsi que pour son soutien moral. Nous le remercions de nous avoir fait confiance pour ce travail.

Nous remercions les membres du jury qui nous font le grand honneur d'évaluer ce travail.

Notre remerciement à tous les enseignants de la faculté des sciences de la nature et de la vie et sciences de l'univers et de la terre.

Notre remerciement s'adresse aussi à MR.BERIMA Rabeh pour toute l'aide qu'il nous a apportée.

En fin, merci à tous ceux qui ont rendu possible ce travail, et même s'ils ne retrouvent pas dans cette petite liste, ils sans dans nos pensées.

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction **1**

Chapitre I : Généralité sur les algues et présentation de la spiruline

1.	Généralité sur les algues	3
1.1.	Définition	3
1.2.	Classification des algues	3
1.3.	Présentation des algues bleues	4
2.	Présentation de la spiruline	4
2.1.	Définition de la spiruline	4
2.2.	Historique de la spiruline	5
2.3.	Morphologie de la spiruline	9
2.4.	Taxonomie de la spiruline	11
2.5.	Habitat naturelle	13
2.6.	Reproduction	15

Chapitre II : Intérêt nutritionnelle et thérapeutique de la spiruline

1.	Composition nutritionnelle de la spiruline	17
1.1.	Protéines	18
1.2.	Lipides	20
1.3.	Glucides	21
1.4.	Vitamines	21
1.5.	Pigments	24
1.6.	Enzymes	26
1.7.	Minéraux et oligo-éléments	26
2.	L'intérêt thérapeutique de la spiruline	28
2.1.	Effet hypocholestérolémiant	29
2.2.	Rôle anti-inflammatoire	29
2.3.	Renforcement du système immunitaire	30
2.4.	Activité antibactérienne et antivirale	31
2.5.	Propriétés antioxydantes	31
2.6.	Propriétés anti-cancer	32
2.7.	Propriétés antidiabétique	32
2.8.	Activité Antianémique	33
2.9.	Effet antihypertenseur	34
2.10.	Traitement à l'empoisonnement chronique à l'arsenic	34
2.11.	La Spiruline dans la spermatogenèse	34
2.12.	Effet antiallergique	35
2.13.	La malnutrition	35
2.14.	Effet anticoagulant	36
2.15.	Pathologies digestives	36
3.	Autres effets bénéfiques de la spiruline	37

3.1.	Activité musculaire et aide au sportif	37
3.2.	Effet sur la peau et les phanères	37
3.3.	Perdre du poids	38
3.4.	Lutte contre la fatigue	38
3.5.	Accompagnement de la femme enceinte et allaitante	38
3.6.	Trouble du sommeil/ anxiété/ fonctionnement cérébral	39
3.7.	Effet anti-âge	39
4.	Posologie de la spiruline	40
5.	Effets indésirables	41
6.	Conseils associés	42

Chapitre III La biotechnologie de la spiruline

1.	Définition	43
2.	Domaines d'application	43
2.1.	Aspects biotechnologiques	44
3.	Production de la spiruline	44
3.1.	Production artisanal	45
3.2.	Production semi - industrielle	47
3.3.	Production industrielle	47
4.	Culture de la spiruline	49
4.1.	Bassins de culture	49
4.2.	Milieu de culture	51
4.3.	Condition de la culture	53
4.4.	Techniques de culture	53
4.5.	Formes de la spiruline	58
4.5.1.	La spiruline fraîche	58
4.5.2.	En liquide ou spiruline bleue	59
4.5.3.	En paillette	60
4.5.4.	En comprimés et en gélules	60
4.5.5.	La spiruline en poudre	61
4.5.6.	En pétales	62
5.	Intérêts biotechnologiques de la spiruline	62
5.1.	Dans l'industrie cosmétique	62
5.2.	Dans l'industrie pharmaceutique	63
5.3.	Dans l'Environnement	63
5.4.	Dans l'industrie alimentaire	64
5.4.1.	Aliments fonctionnels à base de spiruline	65
5.5.	Comme complément alimentaire	68
6.	La spiruline en Algérie	69

Conclusion

Références bibliographiques

Résumés

Liste des figures

N° Fig.	Titres	Page
1	Spirulines observées au microscope	5
2	<i>Spirulina maxima</i>	10
3	<i>Spirulina platensis</i>	10
4	Les différents aspects de la spiruline.	10
5	Observation au microscope optique de souches droites et spiralées <i>d'Arthrospira</i> provenant du Burkina Faso	10
6	Zone de croissance naturelle de la Spiruline dans le monde	13
7	Cycle de vie de la spiruline	16
8	Pourcentage des éléments nutritionnels de la spiruline	17
9	Positionnement de la Spiruline par rapports à d'autres aliments	19
10	Présentation des différents domaines d'application de la biotechnologie	43
11	Diverses cultures artisanales de spiruline	46
12	Bassins améliorés à Hawaï	47
13	Exemples de bassins de spiruline	48
14	Photos d'une unité de production de microalgues par photobioréacteurs	49
15	Photobioréacteur contenant une souche de spiruline originaire du Burkina Faso.	50
16	Bassin de spiruline avec un système d'ombrage	50
17	Bassin contenant de la spiruline en milieu de culture	52
18	Système d'aspiration de la spiruline au travers d'une pompe	55
19	Récolte manuelle de la biomasse de spiruline	55
20	Pressage par une presse à vis	56
21	Pâte de spiruline après pressage	56

22	Extrudeuse de capacité d'environ 5 kg de biomasse	57
23	Biomasse transformée sous forme de spaghettis par l'extrudeuse	57
24	Séchage de la spiruline dans un séchoir solaire	58
25	Spiruline liquide	59
26	Spiruline en paillettes	60
27	Spiruline en comprimés	61
28	Spiruline en gélules	61
29	Spiruline en poudre	62

Liste des tableaux

N° Tab.	Titres	Page
01	Classification suivant le CIN	12
02	Sites géographiques où se trouve naturellement le genre <i>Arthrospira</i>	13
03	Analyse moyenne générale pour 100 g de spiruline	17
04	Teneur moyenne et principales fonctions des acides aminés de la spiruline	19
05	représentant le pourcentage des principaux acides gras de la spiruline	21
06	Teneur moyenne et principales fonctions des vitamines liposolubles de la spiruline	23
07	Teneur moyenne et principales fonctions des vitamines hydrosolubles de la spiruline	23
08	Teneur moyenne et principales fonctions des pigments de la spiruline	25
09	Teneur moyenne et principales fonctions des minéraux et des oligoéléments de la spiruline	28
10	Différentes productions de spiruline et leurs caractéristiques	45
11	Composition d'un milieu de culture typique	52
12	Produits céréaliers (couscous artisanal, biscuits et pâtes alimentaires) supplémentés avec la spiruline	65
13	Produits laitiers supplémentés avec la spiruline	66
14	Produits gras à base de spiruline	67
15	Boisson enrichie en spiruline	67

LISTE DES ABRÉVIATIONS

AA :	Acide Arachidonique
AB :	Agriculture Biologique
ADN :	Acide DésoxyriboNucléique
AGPI :	Acide Gras PolyInsaturé
AINS :	Anti-Inflammatoire Non Stéroïdien
AJR:	Apport Journalier Recommandé
ANSES :	Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'Alimentation
ALAT :	Alanine Amino Transférase
ATP :	Adénosine Tri Phosphate
ARN:	Acide RiboNucléique
ART :	Anti-rétro-viral
ASAT :	ASpartate Amino Transférase
Ca-SP:	Calcium Spirulan
CIRC :	Centre International de Recherche sur le Cancer
CMV :	CytoMégalo Virus
COX :	Cyclo-OXygénase
CPK:	Créatine PhosphoKinase
DHA :	Acide DocosaHexaénoïque
DGLA :	Acide Dihomo- γ -Linoléinique
DI/DL:	Dose Inhibitrice/ Dose Létale
DOX :	Doxorubicine
DSI-EC :	Dietary Supplements Information Expert Committee
EROS/ROS:	Espèce Réactive de l'Oxygène
ESCOP:	European Scientific Cooperative On Phytotherapy
FAO:	Food and Agriculture Organization
FDA:	Food and Drug Administration
GLA:	Acide Gamma-Linolénique
GP :	Glutathion Peroxydase
H2O2:	Peroxyde d'hydrogène
HDL:	High Density Lipoprotein

Ig: Immunoglobuline
LDH: Lactate DesHydrogénase
LDL : Low Density Lipoprotein
NKC/ NK: Natural Killer Cell
NO: Oxyde Nitrique
OGM : Organisme Génétiquement Modifié
OH°/ RO : Radicaux libres
OMS : Organisation Mondiale de la Santé
ORL : Oto-rhino-laryngologie
PAM : Programme Alimentaire Mondiale
PGE : Prostaglandine
SIDA : Syndrome d'Immunodéficience Acquise
SNC : Système Nerveux Central
SOD : Super Oxyde Dismutase
TCA : Temps Céphaline Activé
TG: Triglycérides
TP : Temps prothrombine
UI : Unité Internationale
UNESCO: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
UV: Ultra Violet
VIH: Virus de l'Immunodéficience Humaine
VHC : Virus Hépatite C

INTRODUCTION

Introduction

Les algues sont des organismes capables de pratiquer la photosynthèse et vivent majoritairement dans un milieu aquatique. On connaît actuellement environ 25 000 espèces d'algues sur la planète Terre. Parmi elles, on peut distinguer une algue bleue microscopique, apparue avec les premiers êtres vivants il y a environ 3,5 milliards d'années et considérée comme l'aliment naturel le plus complet de notre planète, il s'agit de la Cyanobactérie *Arthrospira platensis*, plus connue sous le nom de Spiruline (**Cruchot, 2008**).

Cette algue bleu-vert filamenteuse prolifère facilement dans les lacs alcalins et eaux saumâtres du monde entier (**Sguera, 2008**). La spiruline a été proposée dans l'alimentation humaine par plusieurs diététiciens et nutritionnistes pour sa facilité de culture, sa haute productivité et son faible coût de production, mais aussi pour ses qualités nutritionnelles indéniables. (**Sall et al., 1999**). Grâce à ses qualités nutritionnelles complètes, incluant une valeur élevée en protéines (jusqu'à 70% en masse), des acides aminés et acides gras essentiels, des vitamines et des minéraux, associées à une haute digestibilité alimentaire, elle a fait ses preuves dans le cadre d'essais de réhabilitation nutritionnelle dans les pays où sévit la malnutrition. Elle serait ainsi un moyen de lutte pour éradiquer la faim dans le monde. On peut citer certaines études ont mis en évidence des vertus thérapeutiques de la spiruline : des activités sur le système immunitaire, des effets dans la lutte contre les allergies le cancer et le SIDA mais aussi contre le vieillissement cellulaire, des propriétés anti-inflammatoires et hépato-protectrices.

Depuis plusieurs années, elle est cultivée artisanalement dans les pays en développement sous la tutelle d'ONG. Aujourd'hui, elle fait l'objet d'une culture intensive dans les pays développés. Des fermes industrielles modernes de plusieurs hectares exploitent cette cyanobactérie et commercialisent de nombreux compléments alimentaires vantant les mérites de l'algue aux mille vertus. Les nombreuses qualités de cette algue en font sans nul doute un aliment fonctionnel qui intéressera les industries agro-alimentaires et cosmétiques. Cependant, il est difficilement concevable que cette algue non brevetable, intéresse en tant que telle, des laboratoires pharmaceutiques pour le développement d'un médicament. (**Sguera, 2008**).

Ces caractéristiques exceptionnelles ont attiré notre attention pour réaliser une étude bibliographique sur la Spiruline à partir des principales publications scientifiques recensées sur *Arthrospira platensis*.

Notre travail est divisé en trois parties :

- La première partie, nous présenterons brièvement les algues s'en suivra une présentation de la spiruline de manière générale.
- Dans la deuxième partie nous évoquerons la composition de la spiruline, ses propriétés thérapeutiques, ses effets indésirables et sa posologie.
- Enfin, la dernière partie portera la production de la spiruline (du début de la culture jusqu'à l'obtention d'une spiruline utilisable), ensuite les différents applications de cette micro algue à l'échelle industrielle et sa développement en Algérie.

Chapitre I. Généralité sur les algues et présentation de la spiruline

Chapitre I. Généralité sur les algues et présentation de la spiruline

1. Généralité sur les algues

1.1. Définition

Les algues sont des organismes capables de pratiquer la photosynthèse et vivant majoritairement dans un milieu aquatique (marin ou dulcicole), ce sont donc des végétaux. [1]

Les algues sont des végétaux chlorophylliens aquatiques ne possédant ni racines, ni feuilles, ni fleurs, ni vaisseaux, ni graines. Elles se développent par photosynthèse à partir d'éléments simples comme le dioxyde de carbone (CO₂), l'eau, l'énergie lumineuse et les sels minéraux. [2]

Les algues forment un groupe taxinomique constitué de plusieurs organismes aquatiques simples et d'organismes vivant dans des milieux humides tels que les surfaces rocheuses humides, les troncs d'arbres, les monticules de mousse ou la terre humide. Quelques espèces des déserts sont même endolithiques (c'est-à-dire qu'elles vivent dans les pores de la roche) et dépendent de la rosée comme source d'humidité. D'autres poussent sur la neige fondante ou vivent attachées sous la surface de glaces flottantes.

Elles constituent des structures reproductrices non protégées. Chez certaines des formes morphologiquement les plus évoluées qui possèdent des tissus conducteurs, le tissu ne contient pas de lignine, un composé caractéristique des parois cellulaires des plantes ligneuses. [3]

1.2. Classification des algues

On considérait autrefois le groupe hétérogène des algues comme faisant partie intégrante du règne Végétal. Avec la nouvelle classification en cinq règnes, on considère que toutes les algues eucaryotes (cellules à noyau distinct) font maintenant partie du règne des Protistes, tandis que les algues bleu-vert ou Cyanobactéries (autrefois appelées Cyanophycées) et les Prochlorophytes sont classées dans le règne des Monères avec les autres organismes procaryotes (cellules sans noyau distinct, bactéries). Certains phycologistes (du

grec *phykos*, « algue » et *logos* « science ») considèrent toutefois encore les algues comme des plantes.

Il existe des organismes procaryotes (les cyanobactéries) et eucaryotes. Ces derniers sont répartis en plusieurs taxons dont les plus importants sont :

- les algues bleues
- les algues brunes
- les algues rouges
- les algues vertes.

1.3. Présentation des algues bleues

Les cyanobactéries, ou *cyanophycées*, ou improprement dites algues bleues, ou encore autrefois appelée « algues bleu-vert » sont des bactéries photosynthétiques. [4], [5]. Ce sont des organismes microscopiques d'apparence végétale que l'on trouve dans les étangs, les rivières, les lacs et les ruisseaux.

Les algues bleues peuvent être identifiées par les quelques caractéristiques résumées ci-après :

- Les « blooms » se traduisent en une épaisse couche mousseuse et/ou ressemblant à de la peinture à la surface de l'eau.
- Leur couleur varie du vert, bleu-vert, jaune-brun, rouge ou blanc.
- Certaines cyanobactéries peuvent former des colonies sphériques, petites boules vertes de 2-3 mm de diamètre flottant à la surface ou dans la colonne d'eau. L'eau dégage alors une odeur d'herbe coupée, de terre ou de putréfaction.
- D'autres colonies de cyanobactéries prennent la forme de filaments ou stries, plus ou moins longues. C'est un critère de reconnaissance assez fiable.
- Les « blooms » de cyanobactéries peuvent être confondus avec ceux résultant de la prolifération d'autres algues ou microorganismes. [6]

2. Présentation de la spiruline

2.1. Définition de la spiruline

La spiruline est une cyanobactérie spiralée de couleur bleu-vert photo-autrophe c'est un organisme procaryote qui partage avec les plantes la capacité d'effectuer de la photosynthèse. À partir de composés minéraux, d'eau, et de l'énergie lumineuse captée grâce

à leur chlorophylle, elles transforment le gaz carbonique et dégagent l'oxygène. (Ingrid C. et Martin W, 1999).

Il est admis par la communauté scientifique que l'apparition des cyanobactéries date 3,5 milliards d'années de constituant ainsi les plus anciennes formes de vie sur terre. (Bernard, 2014).

Il existe deux espèces principales de spiruline (Fig. 01):

- la *Spirulina platensis* du Tchad : la plus connue et la plus cultivée. Elle a une longueur qui peut atteindre 350 μm et un diamètre compris entre 6 et 12,45 μm ;
- la *Spirulina maxima* du Mexique : elle se caractérise par des trichomes de 70 à 80 μm de long et de 7 à 9 μm de diamètre, légèrement effilés aux extrémités.

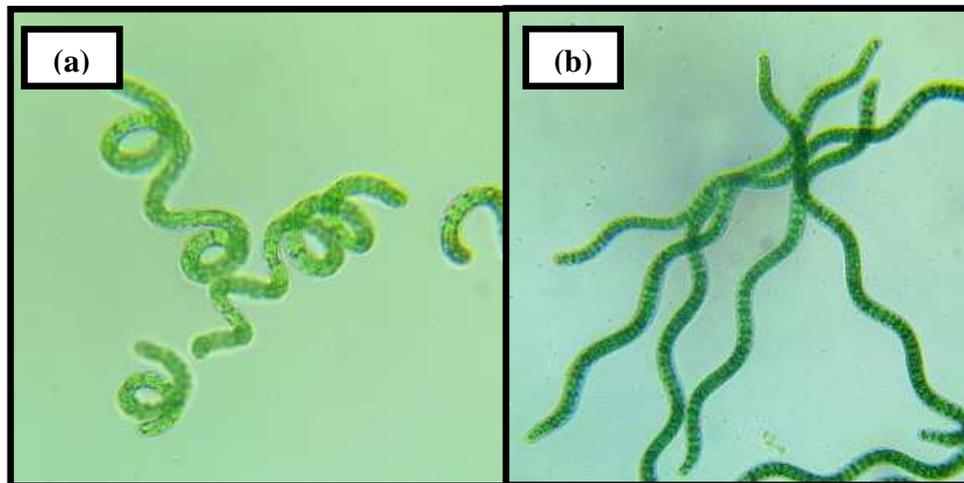


Figure 01 : Spirulines observées au microscope : *Spirulina platensis* (a) et *Spirulina maxima* (b) (Ahounou, 2018).

2.2. Historique de la spiruline

Les algues sont au menu des humains depuis la nuit des temps. Elles sont un aliment de base en Chine et au Japon dès la préhistoire. En Europe pendant l'antiquité, les algues sont utilisées comme aliments pour le bétail, colorants et médicaments contre les vers parasites (Vidal, 2008). Il existe près de 1500 espèces « d'algues bleues » dont 36 comestibles. Parmi elles, la spiruline est consommée des deux côtés de l'atlantique par les Kanembous du Tchad et par les Aztèques depuis des temps immémoriaux.

☒ **Au XVIème siècle** : Sur les rives du lac Tchad, le vent pousse les algues vers le rivage où elles forment un épais tapis de verdure récolté par les Kanembous. Récoltée dans

des pots d'argiles, la spiruline est égouttée à travers des sacs de tissus puis séchée au soleil. Par la suite, elle est transformée en galette baptisée le dihé et est vendue sur le marché local. Le dihé est émietté dans une sauce composée de tomates, de piments, d'épices et accompagne le mil pilé cuit à l'eau (**Gantar et Svirčev, 2008**).

La légende raconte que les femmes enceintes consommaient abondamment le dihé, persuadées que la couleur sombre du dihé protégerait leurs foetus du mauvais oeil (**Ciferri, 1983**).

☒ **Au XVI^{ème} siècle** : À leur arrivée dans la vallée du Mexique, les conquistadors espagnols découvrent « une nouvelle nourriture » que les Aztèques appelaient le tecuitlat signifiant « excrément de pierre » parce qu'ils pensaient qu'il était produit par les minéraux. Récolté à l'aide de filets très fins à la surface du lac Texcoco, il était ensuite transformé en gâteaux d'une couleur bleu-vert (**Habib et al. 2008**).

L'histoire relate aussi que l'empereur Moctezuma II raffolait de poisson frais. Or ce dernier vivait dans un palais situé à 200 m d'altitude et à 300 km de la mer. À une époque où il n'y avait ni chevaux, ni glace pour conserver les aliments puisque le climat était tropical, le transport de cette denrée périssable était confié à d'athlétiques coursiers qui se relayaient pour apporter du poisson frais à leur empereur grâce à la consommation de tecuitlat (**Vidalo, 2008**).

À la fin du XVI^{ème} siècle le tecuitlat tombera dans l'oubli probablement après l'assèchement des lacs au profit des développements urbains et agricoles. Le lac Texcoco représente de nos jours le seul vestige de cette époque.

En 1844, près de Montevideo, deux chercheurs, Wittrock et Nordstedt, signalent la présence d'une « microalgue » bleu-vert hélicoïdale baptisée *Spirulina jenneri* f. *platensis*.

C'est en 1852, que sera publié le premier rapport taxonomique rédigé par Stizenberger qui lui donne le nom d'*Arthrospira* en raison de sa forme en hélice et de sa structure multicellulaire.

Puis en 1940 pendant la seconde guerre mondiale, Y. Creach, une pharmacienne des troupes coloniales Françaises stationnée à Fort Lamy, aujourd'hui Ndjamena, découvre les

gallettes d'algues séchées appelées dihé, et s'y intéresse de près. Elle en rapporte quelques échantillons pour les analyser et les identifier (**Vidalo, 2008**).

En France le botaniste Dangeard rapporte l'expérience d'Y. Creach, et fait une présentation à la société Linnéenne de Bordeaux en 1940 en mentionnant pour la première fois l'utilisation de la spiruline en alimentation humaine. Publié pendant la guerre, son compte rendu passera inaperçu (**Paniagua-Michel et al., 1993**).

En 1959 l'anthropologue Max-Yves Brandily publie dans science et avenir un article sur ces gâteaux d'algues pleins de sable, intitulé : « depuis des lustres une tribu primitive du Tchad exploite la nourriture de l'an 2000 » (**Vidalo, 2008**).

Dans les années 1960 (**Cruchot, 2008**) - Le botaniste Belge Jean Leonard remonte la filière de la galette verte jusque sur les rives du lac Tchad. En 1964, Leonard et confrère P. Compère analysent le dihé et déterminent la spiruline confirmant ainsi le rapport de Dangeard.

C'est ainsi que l'Institut Français du Pétrole (IFP), par l'intermédiaire de l'un de ses membres Clément G., a lancé des études sur cette fameuse « algue ». Grâce à cet institut, la France a pu devenir pionnière en ce qui concerne l'étude de la spiruline.

La spiruline sera redécouverte accidentellement par un ingénieur Français Hubert Durand Chastel qui arrive au Mexique pour prendre la direction de Sosa Texcoco, une unité de production de carbonate de soude. La matière première, la saumure, est extraite des sédiments du lac Texcoco. L'un des problèmes de l'exploitation est une matière organique qui perturbe la cristallisation des carbonates. Considérée comme une nuisance, elle est brûlée avec les ordures.

C'est en assistant en 1967 à une conférence sur la spiruline au cours d'un congrès sur le pétrole à Mexico, et suite aux publications de Max Yves Brandily, qu'il fait le rapprochement avec cette substance qui le gênait dans sa production. Il débutera la culture d'*Arthrospira maxima* en 1968 et sa commercialisation se fera en 1976.

En 1970, l'Américain Ripley FOX docteur en microbiologie voit en la spiruline un complément nutritionnel par excellence, et la solution au problème de la faim dans le monde. Il décide d'en faire un outil politique humanitaire. En 1971, il fonde une association ACMA

(Association pour Combattre la Malnutrition par l'Algoculture) qui développe le concept de ferme de spiruline (**Fox, 1999**).

Parallèlement, en 1970, un rapport du Dr Hiroshi Nakamura (microbiologiste président du comité de développement de la spiruline au Japon) indique toutes les caractéristiques de la spiruline. Ce scientifique japonais a réuni les études concernant « l'algue » qui avait été utilisée comme nourriture pendant le blocus Américain, durant la seconde guerre mondiale. Son rapport sera publié en 1978, dans l'ouvrage « Food from Sunlight » du Dr Christopher (**Cruchot, 2008**).

En 1974, la spiruline est déclarée « aliment de santé supérieur du XXIème siècle » lors de la conférence internationale sur les protéines microscopiques et la conférence alimentaire des Nations unies (**Vidal, 2008**).

La première expérience industrielle a lieu au Mexique avec Hubert Durand Chastel par le biais de la société Sosa Texcoco. La spiruline sèche arrivera sur les étagères des magasins de santé Américains en 1979 (**Vidal, 2008**).

L'usine du Mexique fermera ses portes mais la relève sera assurée par l'entreprise Earthrise Spirulina Company aujourd'hui leader mondial sur le marché de la spiruline (**Vidal, 2008**).

En 1984, c'est au tour de la Chine de se lancer dans la production de spiruline à l'état naturel (dans le lac Chenghai) (**Fox, 1999**).

D'autres exploitations s'ensuivront un peu partout dans le monde. Grace aux progrès faits sur les techniques de culture, l'Europe est entrée dans la course et les productions à petite échelle se développent dans les pays en voie de développement (**Vidal, 2008**).

Enfin, au début des années 1990, l'organisation humanitaire Suisse Antenna Technologies, renoue avec le projet de Fox. Cette ONG pense que la spiruline peut résoudre le problème de la faim dans le monde. Afin d'asseoir la crédibilité scientifique de son programme, Antenna Technologies financera quelques études sur la spiruline.

En 1996, l'OMS (Organisation mondiale de la santé) déclare la spiruline "meilleure nourriture pour l'avenir" (**Ahounou, 2018**).

En Algérie, aucune allusion à la consommation ou à l'utilisation de la spiruline n'est faite. Son existence dans notre pays, n'a été signalée qu'au cours de ces vingt dernières années. De modestes initiatives ont été entreprises au lacs d'El Goléa, à Tamanrasset et plus récemment, en 2009 à Mostaganem (**Lupatini et al., 2017**).

2.3. Morphologie de la spiruline

La spiruline est généralement décrite comme une algue microscopique multicellulaire et filamentaire bleu verte de forme hélicoïdale spiralée (dont elle tire son nom, *Arthrospira platensis*) a une morphologie très variable, selon la souche et les conditions de milieu de culture Elle se compose de cellules végétatives présentent des parois facilement visibles, empilées bout à bout, appelées filaments ou trichomes le filament est mobile, non ramifié et prend une forme hélicoïdale uniquement en milieu liquide a une longueur moyenne d'environ 250 μm , un diamètre de 10 à 12 μm et s'enroule en 6 ou 7 spires. Cette forme hélicoïdale typique donne à la spiruline l'allure d'un minuscule ressort. Elle lui permet de se déplacer dans l'eau en adoptant le mouvement d'une vis, à une vitesse de 5 $\mu\text{m/s}$. (**Charpy et al., 2008**).

Les deux espèces les plus souvent retrouvées pour l'alimentation sont *Arthrospira platensis* et *Arthrospira maxima* (**Fig. 02, 03**)

Elles sont souvent nommées par le nom de genre *Spirulina* dans la littérature. Les différences entre ces deux espèces sont les suivantes :

- *Arthrospira platensis* : se caractérise par des trichomes atteignant 350 μm de long et entre 6 et 12,45 μm de diamètre ; ils sont un peu rétrécis au niveau des articulations. Les tours de spires ont un diamètre de 20 μm à 50 μm diminuant légèrement vers les extrémités. (**Cruchot, 2008**).
- *Arthrospira maxima* : se caractérise par des trichomes de 70 à 80 μm de long de 7 à 9 μm de diamètre et légèrement effilés aux extrémités ; ils forment une spirale régulière de 3 à 8 tours et de 40 à 60 μm de diamètre. Les cellules constituant les trichomes mesurent entre 5 à 7 μm de long et ne rétrécissent pas au niveau des articulations (**Cruchot, 2008**).

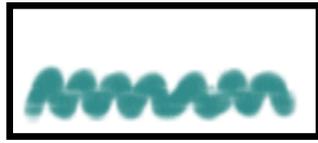


Figure 02 : *Spirulina maxima*
(Cruchot, 2008).



Figure 03 : *Spirulina platensis*
(Cruchot, 2008).

Les facteurs environnementaux, principalement la température, les conditions physiques et le milieu de culture, peuvent affecter la géométrie de l'hélice, par conséquent, cette cyanobactérie montre une grande variété morphologique :

- Spirales : désigne les souches dont les filaments ont la forme du ressort.
- Ondulées : désigne les souches dont les filaments sont en spirale étirée.
- Droites : désigne les souches dont les filaments sont tellement étirés qu'il donne l'impression d'être presque rectiligne

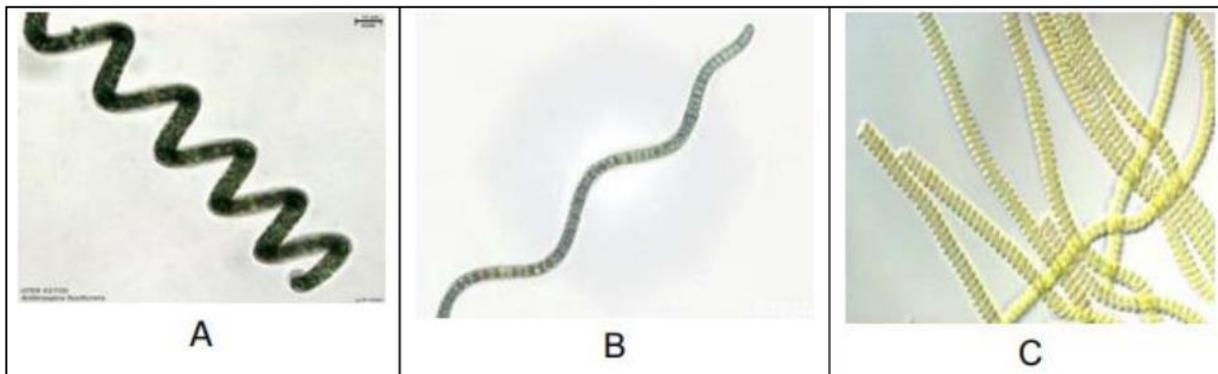


Figure 04 : Les différents aspects de la spiruline. (A) spiralee, (B) ondulée, (C) droite
(Ahounou, 2018).



Figure 05 : Observation au microscope optique de souches droites et spirales d'*Arthrospira* provenant du Burkina Faso (Ahounou, 2018).

Certaines souches initialement spiralées peuvent devenir ondulées ou droites , ceci est peut-être dû aux facteurs physicochimiques exogènes tels que la température, ou d'autres facteurs probablement liés aux changements génétiques .

2.4. Taxonomie de la spiruline

Il existe une véritable confusion entre les termes *Spirulina*, Spiruline et *Arthrospira*. Ces troubles sur la nomenclature est aujourd'hui compliquée par la commercialisation du produit industriel "*Arthrospira*" sous le faux nom taxinomique "Spiruline" et ils résultent à la fois d'erreurs de détermination scientifique(**Scheldeman et al.,1999**).

Dans les années cinquante, trois définitions différentes sont apparues afin de distinguer les termes de spiruline :

- Spiruline : C'est le nom commercial d'une cyanobactérie alimentaire appartenant toujours au genre *Arthrospira*.
- *Spirulina* : C'est le nom commercial anglais d'une cyanobactérie.
- *Spirulina* aussi est un nom scientifique d'un genre de Cyanobactérie assez éloigné des *Arthrospira*. On connaît par exemple *Spirulina subsalsa*, *Spirulina major*, etc. Aucune cyanobactérie du genre *Spirulina* n'a été testée Scientifiquement sous l'angle de l'alimentation humaine. Il n'existe aucun commerce de cyanobactéries du genre *Spirulina*. Les Spirulines sont des cyanobactéries filamenteuse comparant plusieurs dizaines de cellules alignées d'une manière fortement spiralée.
- *Arthrospira* : C'est le nom scientifique d'un genre de cyanobactérie assez éloigné du genre *Spirulina*. Le genre *Arthrospira* comprend l'ensemble des cyanobactéries alimentaire vendues sous le nom de Spiruline (*Spirulina* en anglais).

Les scientifiques qui étudient la spiruline pensaient initialement qu'il existait de nombreuses espèces d'*Arthrospira*. Mais, Scheldeman et Coll., ont analysé les caractéristiques génétiques de la spiruline en 1999 sur la base de l'ARDA (Amplified Ribosomal DNA Restriction Analysis) et ils ont trouvé qu'il n'y avait que deux espèces d'*Arthrospira* (*platensis* et *maxima*). Ils supposent ensuite que ces deux espèces dérivent plusieurs souches (**Ahounou, 2018**).

De même, En 2009, Antenna technologies foundation, en collaboration avec l'université de Genève, a effectué un travail de classification de différentes souches d'*Arthrospira*, leur conclusion est qu'il n'existerait que deux espèces génétiquement

différentes parmi ces souches, Ces deux espèces sont *Arthrospira platensis* initialement originaire du Tchad et *Arthrospira geitleri* ou *maxima* originaire du Mexique (El Khilifi, 2020).

- **L'espèce mexicaine *Arthrospira maxima*** : elle était mangée par les Aztèques du lac Texcoco avant la conquête de l'Espagne. Elle se caractérise par des trichomes de 70 à 80 µm de longueur, 7 à 9 µm de diamètre et des extrémités effilées (Sguera, 2008).

- **L'espèce du Tchad *Arthrospira platensis*** : pousse naturellement dans les eaux tropicales ou subtropicales riches en carbonates et en bicarbonates, Elle se caractérise par des trichomes plus long (de 250-350 µm), 10 à 12 µm de diamètre et Les tours de spire diminuant légèrement vers les extrémités (Sguera, 2008).

Les cyanobactéries ont d'abord été considérées comme des algues jusqu'en 1962 et pour la première fois, ces algues bleues ont été ajoutées au procaryote. elle appartient donc au domaine des bactéries .

La classification taxonomique des cyanobactéries est gouvernée par deux codes : les codes botaniques et bactériologiques. Pour effectuer cette classification, nous avons interrogé plusieurs bases de données validées par l'agence canadienne d'inspection des aliments.

- Le CIN « Code international de nomenclature pour les algues, les champignons et les plantes ».

Selon ce code, la classification se base sur des critères morphologiques permettant une identification aisée des genres. Les cyanobactéries y portent pour nom : algue bleue, cyanophyte ou *Cyanophycée*.

Cette classification botanique est proposée sur les sites « catalogue of life2 » et « ITIS3 » accessibles en ligne. Les données extraites de ses deux sites internet ont été résumées dans (Tab. 01) :

Tableau 01: Classification suivant le CIN

Règne	<i>MONERA</i>
Sous règne	<i>NEGIBACTERIA</i>
Division	<i>CYANOBACTERIA</i>
Classe	<i>CYANOPHYCEAE</i>
Ordre	<i>NOSTOCALES</i>

Famille	OSCILLATORIACEAE
Genre	ARTHROSPIRA (STIZENBERGER) EX GOMONT 1893
Espèces	-ARTHROSIPRA GOMONTIANA SETCHELL 1895 - ARTHROSPIRA JENNERI STIZENBERGER EX GOMONT 1893 -ARHTROSPIRA NEOPOLITANA

2.5. Habitat naturelle

La spiruline se développe naturellement dans des lacs alcalins riches en sels minéraux des régions chaudes et ensoleillées, soit dans une zone tropico-équatoriale entre la 35° latitude nord et 35° latitude Sud (zone qui comporte en Afrique : Tchad, Kenya, Tanzanie (lac Natron), Djibouti, Éthiopie, Congo, Zambie, Algérie, Soudan, et Tunisie ; en Europe : France, Corse, Espagne ; en Asie : Inde, Thaïlande, Myanmar, Sri Lanka, Pakistan, Chine et en Amérique : Pérou, Mexique, Uruguay, Équateur, Californie, Haïti, République Dominicaine). (Fox, 1999)

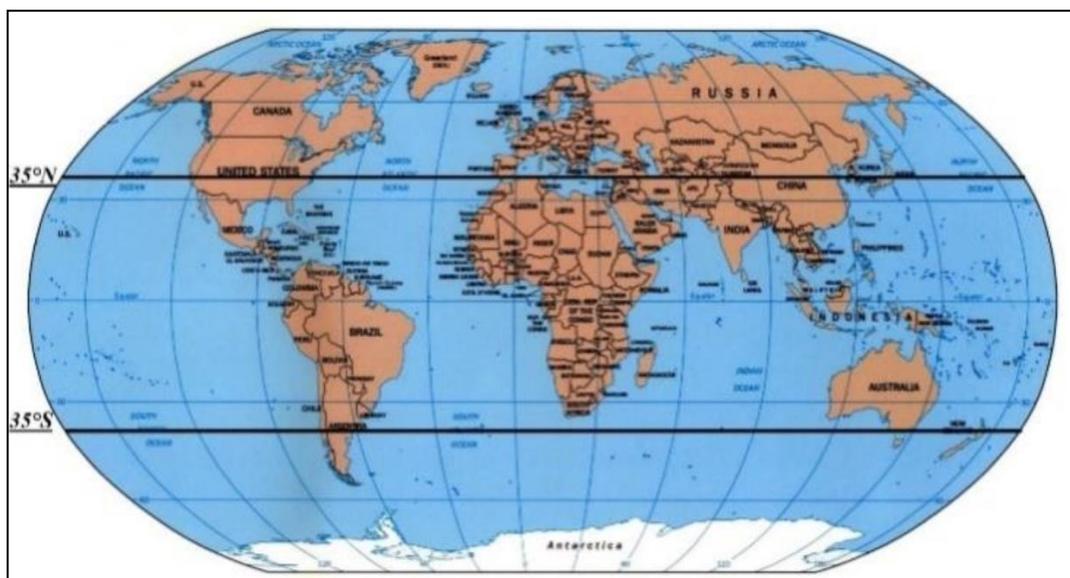


Figure 06: Zone de croissance naturelle de la Spiruline dans le monde(Fox,1999)

Tableau 02 : Sites géographiques où se trouve naturellement le genre Arthrospira (Scheldeman *et al.*, 1999).

Afrique	
Algérie	Tamanrasset (Boileau, 1988 in FOX, 1999),
Tchad	La région du Kanem : les lacs Latir, Ouna, Borkou, Katam, Yoan, Leyla, Bodou, Rombou, Moro, Mombolo, Liwa, Iseirom, Ounianga kebir
Soudan	Cratère du Djebel Marra
Djibouti	Lac Abber
Ethiopie	Lacs Aranguadi, Lesougouta, Nakourou, Chiltu, Navasha, Rodolphe
Congo	Mougounga
Tanzanie	Lac Natron

Kenya	Lacs Nakuru, Elmenteita, Cratère, Natron
Tunisie	Lac Tunis (Belkir, 1978), Chott el Jend (Belkir, 1997)
Zambie	Lac Bangweoulou
Madagascar	Beaucoup de petits lacs près de Toliara (Nguyen Kim Ngam, 1994)
Asie	
Inde	Lac Lonar (Damle, 1978), un réservoir près de Madurai (Bai, 1984), un réservoir près de Calcutta (Biswas), Lac Nagpur (Pargaonkar, 1981)
Myanmar	Lacs Twyn Taung, Twyn Ma et Taung Pyank (Min Thein, 1984)
Sri Lanka	Lac Beira
Pakistan	Mares près de Lahore (Ghose, 1924) (Fox, 1980)
Thaïlande	Lacs d'effluents d'une usine de tapioca, province de Radburi, 80 km au S.O. de Bangkok (Tanticharoen, 1985)
Azerbaïdjan	(Woronichin, 1924)
Amérique du sud	
Pérou	Lac Huacachina, près d'Ica, maintenant rempli d'eau douce, il ne contient plus de spiruline. Lac Orovilca (Lopez, 1980), maintenant asséché. Lac Ventanilla, sur la côte près de Lima (Figueroa, 1987) : on n'en trouve plus actuellement. Réservoir d'eau près de Paracas (Fuentes et al. 1993)
Mexique	Lac Texcoco (David, 1976), Lac Cratère (Durand-Chastel, 1990)
Uruguay	Montevideo, 1884, signalé par Arechavaleta in Wittrock, Nordstedt
Pérou	trouvé en association avec Cladophora près de l'île d'Amantani dans le lac Titicaca (Fox, 1993), spécimen de Cladophora de Gilles Planchon & Rosario Fuentes
Equateur	Lac Quilotoa : cratère diamètre 1 kilomètre (Yann Leroux, 1998)
Amérique du nord	
Californie	Oakland, Key Route Power House (Gardner, 1917) ; Del Mar Beach (Lewin, 1969) Un moulin à huile (Knutsen, 1994)
Haïti	Lac Gonâve (Pierre, 1986)
République Dominicaine	Lac Enriquillo (Durand Chastel, 1993)
Europe	
France	Camargue (Planchon et al. 1994)
Hongrie	(Kiss, 1957)
Site où la spiruline a été introduite par le flamant nain, <i>Phoenicoparrus minor</i>, en Afrique et en Asie, et le flamant de James, <i>Phoenicoparrus jamesi</i>, en Amérique du Sud (Ogilvie et al. 1986)	
Ethiopie	Lac Abiata
Kenya	Lac Rodolphe, Lac Hannington
Tanzanie	Lac Manyara, Lac Rukua
Zambie	Lac Mweru
Botswana	Makgadikgadi Sait Pans
Namibie	Etosha Sait Pan
Afrique du Sud	État Libre d'orange, près de Vaaldam
Bolivie	Lacs Colorado, Poopo, Chalviri, Salar d'Uyuni
Chili	Aguas Calientes, Lagunas Brava, Lac Vilama, Salar de Surire
Mauritanie	Côte sud
Inde	Rann of Kutch, Gujarat
Madagascar	Côte ouest

L'habitat naturel de la spiruline est une eau soit :

- natron (désigne d'abord un minéral, le carbonate de sodium décahydraté) dont le pH doit être compris entre 8,5 et 11
- saumâtre (de 20 à 70 g de sel par litre d'eau).
- chaude (entre 35 et 40°C), la croissance varie durant la journée, en dessous de 15°C et au-dessus de 39°C, elle s'arrête.
- où le rayonnement solaire est important (donc soit sous les tropiques soit en altitude).
- riche en nutriments apportés par les affluents des lacs et des sols (fer, azote, urée, acide phosphorique, sulfate de magnésium...).
- riche en gaz carbonique et oxygène.

Par ailleurs ce milieu chaud et alcalin, et la forte concentration en bicarbonate sont peu propices à la prolifération d'autres micro-organismes, garantissant une propreté microbiologique ; les autres espèces ayant du mal à survivre. La présence d'ammoniac empêche la croissance des amibes.

2.6. Reproduction

A la maturité, la spiruline se reproduit suivant un mode végétatif asexué, la multiplication ne se produit que par fragmentation ; le trichome forme des cellules spéciales appelées nécriidies assimilées à des disques de séparation agissent comme des cellules spécialisées uniques, permettant la rupture du trichome, au niveau desquelles le trichome est divisé en plusieurs parties pour donner de nouveaux filaments de 2 à 4 cellules appelés Hormogonies.

Les cellules d'hormogonie subissent des processus d'agrandissement et de maturation, chaque individu va donner deux individus par scissiparité, qui lui sont identiques génétiquement et plus ou moins morphologiquement (**Théodore, 2017**). et prendre la forme typique hélicoïdal, suivant un cycle de développement décrit dans (**Fig. 07**)

Il convient de noter que la spiruline a une grande capacité de reproduction, dès que le milieu est favorable, la souche doublant sa quantité en 4 jours (**Manet, 2016**)

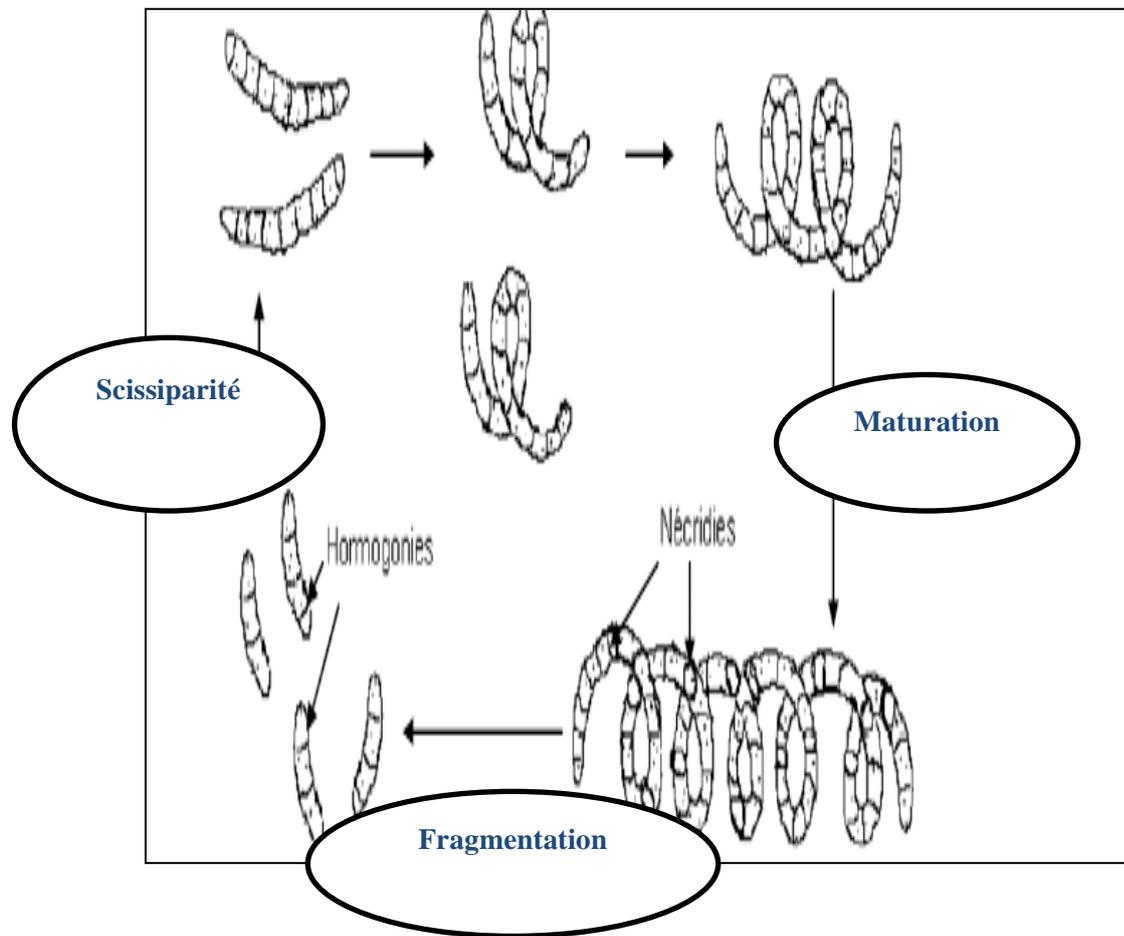


Figure 07 : Cycle de vie de la spiruline (Ciferri, 1983).

Chapitre II

Intérêt nutritionnelle et thérapeutique de la spiruline

Chapitre II: Intérêt nutritionnelle et thérapeutique de la spiruline

1. Composition nutritionnelle de la spiruline

La composition de la spiruline varie selon les conditions de culture, la période de récolte, l'origine géographique, le procédé de récolte, de séchage, de broyage, de conditionnement, mais aussi par le taux d'ensoleillement et par le fait que certains industriels supplémentent les milieux de culture afin que la spiruline produite soit plus riche en fer, en zinc ou encore en acides gras. En général la spiruline est composée de 65 % de protéines, 15 % de glucides, 6 % de lipides, 7% 19 de minéraux et de 3 à 6 % d'eau. Cette composition est très complète et variée : avec un excellent apport en protéines, une bonne répartition des lipides, des glucides, des vitamines, des minéraux et des oligo-éléments. (Rogowski, 2008)

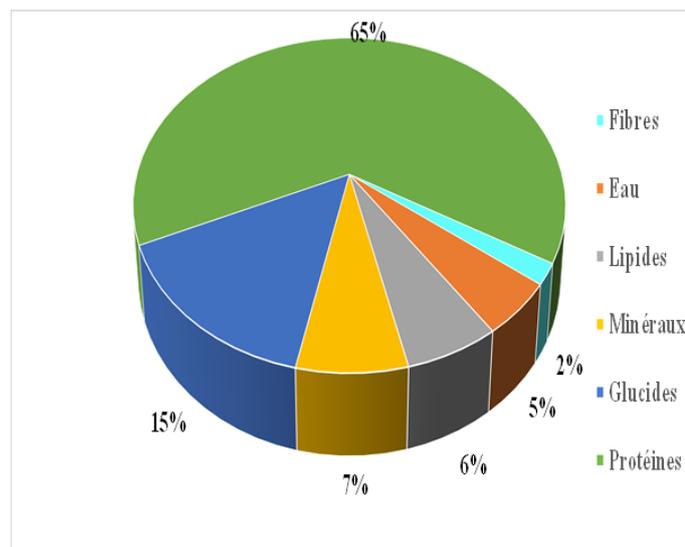


Figure 08: Pourcentage des éléments nutritionnels de la spiruline [7]

Tableau 03: Analyse moyenne générale pour 100 g de spiruline [8]

Vitamines		Minéraux	
Éléments	Quantité (mg)	Éléments	Quantité (mg)
Provitamine A	205	Calcium	558
E	3,5	Fer	73
B1	3,2	Phosphore	1,1
B2	3,6	Magnésium	593
B3	14	Zinc	2,3
B5	0,15	Manganèse	3,2
B6	0,5	Potassium	1,8
B12	0,25	Sodium	1,4

Pigments		Autres	
Éléments	Quantité (mg)	Éléments	Quantité
Phycocyanine	8000	Acide gamma-linolénique	870 mg
Chlorophylle A	908	Acides aminés	17 dont 8 essentiels
Caroténoïdes	450	Valeurs énergétiques	160 KJ

La consommation quotidienne ou biquotidienne d'une cuillère à café de spiruline apporte de nombreux éléments essentiels, dont nous manquons parfois

1.1. Protéines

Indispensables à la vie, les protéines sont les molécules organiques les plus abondantes dans le corps humain – responsables de la structure et de la constitution chimique des individus – sous forme d'enzymes, d'hormones, d'anticorps, réparant les tissus, et essentiels à l'équilibre acidobasique.

Vingt (20) acides aminés sont à la base des protéines, le corps étant capable d'en fabriquer les 8 autres étant considérés comme essentiels et doivent être apportés par l'alimentation. La spiruline contient ces 8 acides aminés essentiels en proportions intéressantes et directement assimilables.

Elle possède 50 à 70 % de son poids sec en protéines avec des variations de 10 à 15 % selon le moment de la récolte. Plus la luminosité est élevée, plus le pourcentage en protéines est élevé. Les acides aminés essentiels sont présents représentant 47 % du poids total des protéines. Les acides aminés les moins représentés sont le tryptophane et ceux soufrés (méthionine, cystéine et lysine).

Concernant les protéines, une notion importante est l'utilisation protéique nette (NPU) déterminée par la digestibilité, et calculée à partir du pourcentage d'azote absorbé. La paroi cellulaire de la spiruline étant fragile – car ne contenant pas de cellulose –, la biodisponibilité des nutriments est optimale. Il n'est donc pas nécessaire de cuire ou de faire un traitement particulier pour rendre les protéines accessibles. Au bout de 18 h, 85 % des protéines sont digérées et assimilées. La NPU de la spiruline (83-90%) est d'autant plus intéressante lorsqu'elle est comparée à celle des lentilles (30 %), de la viande de boeuf (15 %) ou du lait de vache (12 %) (**Dupire, 2011**).

La FAO et l'OMS préconise un apport minimal en protéines de 0,57 g/kg/j soit 42 g pour un adulte de 75 kg. 10 g de spiruline n'apporte finalement que peu de protéines (7 g) sur les 42 nécessaires mais l'apport qualitatif, la composition en acides aminés essentiels est plus importante que l'apport quantitatif.

La spiruline contient des acides nucléiques (4,2 à 6 % du poids sec) (30 % ADN et 70 % ARN) qui en se dégradant produit de l'acide urique, cet acide urique pouvant entraîner des calculs rénaux ou des crises de goutte, la spiruline est à utiliser avec précaution chez les patients ayant déjà fait une crise de goutte. Même s'il faudrait 80 g de spiruline pour atteindre 4 g d'acides nucléiques, la dose maximale tolérable à long terme (**Charpy *et al.*, 2008**).

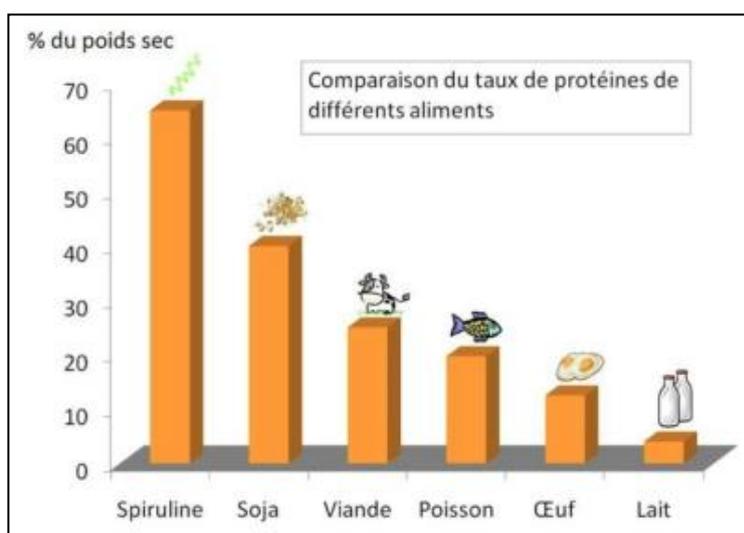


Figure 09 : Positionnement de la Spiruline par rapports à d'autres aliments [9]

Les teneurs moyennes et les principales fonctions des acides aminés de la spiruline sont résumées dans ci-dessous (**Tab. 04**):

Tableau 04 : Teneur moyenne et principales fonctions des acides aminés de la spiruline (**Vidalo, 2008; Vasson, 2015; Manet, 2016**).

Acides Aminés (AA)	Teneur moyenne dans 10g de spiruline	Principales fonctions
Isoleucine	350 mg (50% des AJR)	Indispensable dans le processus de croissance
Leucine	540 mg (49% des AJR)	Stimule les fonctions cérébrales
Lysine	290 mg (36% des AJR)	Production d'Anti corps, d'enzymes, d'hormones
Méthionine	140 mg (23% des AJR)	Antioxydant puissant
Phénylalanine	280 mg (140% des AJR)	Indispensable à la thyroïde
Thréonine	320 mg (64% des AJR)	Améliore la fonction digestive et intestinale
Tryptophane	100 mg (48% des AJR)	Contribue à la synthèse de sérotonine
Valine	400 mg (44% des AJR)	Stimule les capacités mentales et physiques
Alanine	470 mg	Participe au métabolisme du glucose

Acides Aminés (AA)	Teneur moyenne dans 10g de spiruline	Principales fonctions
Arginine	430 mg	Participe à la sécrétion de l'hormone de croissance
Acide aspartique	610 mg	Participe à la synthèse de plusieurs acides aminés
Cystine	60 mg	Indispensable pour l'utilisation de la vitamine B6
Acide glutamique	910 mg	Indispensable dans le métabolisme azoté
Glycine	320 mg	Intervient dans la production de l'ADN et l'ARN
Histidine	100 mg	Indispensable dans le processus de croissance
Proline	270 mg	Indispensable dans la production de collagène
Tyrosine	300 mg	Précurseurs de la dopamine, production thyroxine
Sérine	320 mg	Indispensable à la formation des membranes des cellules, protection des nerfs et synthèse de créatine

1.2. Lipides

La Spiruline n'est pas un aliment gras, les lipides ne représentent, généralement, que à 8% de son poids sec, mais ce pourcentage peut atteindre 11% à 14% maximum selon les modes d'extraction ou la souche de *SPIRULINE* utilisée. Le contenu en acide gras de la *SPIRULINE* peut être aussi modifié suivant les conditions de culture (**Lupatini et al., 2017**).

Les lipides peuvent être séparés en une fraction saponifiable (83%) et une fraction insaponifiable (17%) contenant essentiellement une paraffine, des pigments, des stérols et des alcoolsterpéniques.

a) **Les acides gras** : En règle générale, après hydrolyse, la *Spiruline* renferme principalement des acides gras poly insaturés essentiels à 18 atomes de carbones, notamment de la série oméga-6 ($\omega 6$). C'est en effet unes des meilleures sources d'acide gamma-linoléique (18:3 $\omega 6$) après le lait humain et certaines huiles végétales onéreuses (**Vicente, 2008**). d'autres acides gras essentiels comme l'acide linoléique (18 :2 $\omega 6$) sont retrouvés dans la *SPIRULINE* ainsi qu'un fort pourcentage d'acide palmitique (acide gras saturé) (**Tab. 05**) permettant de préférer certaines souches à d'autres (**Quillet, 1975**).

Les acides gras omega-3 et oméga-6 de la *SPIRULINE* préviendraient l'accumulation de cholestérol dans l'organisme. Ceci pourrait expliquer en partie la diminution des taux en cholestérol et triglycérides observés lors des expériences de Ramamoorthy & Prema kumari (1996) et Samuels et al. (2002) (**Goulamabasse, 2018**).

Tableau 05 : Tableau représentant le pourcentage des principaux acides gras de la spiruline (Falquet et Hurni, 2006).

Acides gras	% des Acides gras totaux
Palmitique (16 :0)	25-60
Stéarique (18 :0)	0,5- 2
Palmitoléique (16 :1)	0,5-10
Oléique (18 :1)	5-16
Linoléique (18 :2)	10-30
AGL (18 :3)	8-40

b) **La fraction insaponifiable :** La fraction insaponifiable est composée essentiellement de stérols, de terpènes, d'hydrocarbures saturés (paraffines) et de pigments. Cette fraction représente 1,1% à 1,3% de la matière sèche de la spiruline. Certains des stérols présents pourraient partiellement expliquer l'activité antimicrobienne de la spiruline, tandis que les hydrocarbures saturés à longues chaînes (paraffine) qui constituent 25% des lipides insaponifiables de la spiruline peuvent être lui donne un caractère toxique. (Goulamabasse, 2018).

1.3. Glucides

Représentant 15 à 25 % de la matière sèche, les glucides sont constituants de la membrane de la spiruline (Mahavir, 2016). Les glucides simples (fructose, glucose et saccharose) sont en faible quantité comme le glycérol, mannitol et sorbitol. Cette faible proportion fait de la spiruline un aliment peu calorique.

Deux substances glucidiques sont importantes : le méso-inositol phosphate, excellente source de phosphore, et le calcium-spirulan un polysaccharide composé de rhamnose, fructose et en quantité moindre de ribose, mannose, glucose, xylose, soufre et calcium. Il a été isolé par plusieurs équipes, et fait l'objet de nombreuses recherches qui seront abordées plus loin.

1.4. Vitamines

Bien que n'ayant pas de valeur énergétique, les vitamines sont essentielles à l'organisme. Elles interviennent dans de nombreuses fonctions biologiques : croissance et développement du squelette, transformation et utilisation des macronutriments, vision, coagulation du sang, systèmes musculaires, nerveux, immunitaires.... Le corps humain étant incapable de les fabriquer (hormis la vitamine K et la D), leur apport par une alimentation

équilibrée et diversifiée est primordial pour un bon fonctionnement de l'organisme et pour la prévention de nombreuses pathologies.

La spiruline est une algue vitaminée, elle est la deuxième source de vitamine B1 derrière la levure de bière. Elle contient aussi une concentration relativement élevée de provitamine A, vitamine B 12 et β -carotène (**Hélène, 2008**).

Le β -carotène représente 40 à 80% des caroténoïdes présents dans la spiruline, la conversion du β -carotène en vitamine A se fait chez l'humain dans une proportion d'environ 17 à 20% seulement, proportion qui peut aussi varier selon la dose de β -carotène absorbée et, sans doute, selon l'état physiologique de la personne. Quelques grammes de Spiruline suffisent donc à couvrir entièrement les besoins en vitamine A d'un adulte (**Falquet et Hurni, 2006**). Par ailleurs, il existe une controverse quant à la quantité de vitamine B12 sous forme active présente dans la spiruline. D'une part, la vitamine B12 de la Spiruline serait constituée de deux analogues dont le majoritaire est une forme inactive : le pseudo vitamine B12 qui ne se fixe pas sur le facteur intrinsèque et est donc inactive. Une étude portant sur la supplémentation en spiruline chez des enfants déficitaires en vit B12 n'a pas permis une amélioration de l'anémie macrocytaire (**Watanabe, 2007**).

De plus, l'American Dietetic Association (Association des Diététiciens du Canada), l'académie Américaine de nutrition et de diététique et plus récemment l'ANSES dans un communiqué récent paru le 30/11/17, affirment que la spiruline ne peut être considérée comme une source fiable de vitamine B12 active, ni les végétales, puisqu'elle est majoritairement présente sous une forme inactive (**Morènikè, 2018**).

➤ **Les vitamines liposolubles** : Les vitamines A, D, E et K sont liposolubles (**Tab. 06**). Elles sont retrouvées dans les aliments riches en graisse et sont stockées dans le foie ou dans le tissu adipeux d'où le risque de surdosage. Si la vitamine D est présente dans les corps gras (source exogène) elle est aussi produite par la peau (source endogène) suite à une exposition au soleil.

Le β -carotène représente 80 % des caroténoïdes contenu dans la spiruline, les 20 % restants sont de la physoxanthine et de la cryptoxanthine. Ces deux caroténoïdes sont convertis en vitamine A uniquement par les mammifères. La vitamine A est retrouvée dans les aliments d'origine animale (foie, huile de foie de morue, poissons, oeufs et laitages) sous forme de rétinol, directement utilisable; dans les végétaux c'est son précurseur, le β -carotène,

ou provitamine A, uniquement transformé selon les besoins de l'organisme qui est retrouvé. 4 g de spiruline apportent autant de β -carotène que 100 g de légumes de couleurs vives. (Manet, 2016). Ces vitamines liposolubles sont présentées dans **Tableau 06**.

Tableau 06 : Teneur moyenne et principales fonctions des vitamines liposolubles de la spiruline (Manet, 2016).

Vitamines liposolubles	Teneur moyenne dans 10g de spiruline	Principales fonctions
A (provitamine A)	15 à 24 mg (1000% des AJR)	Croissance, Vision, Antioxydant
D	1200 UI	Minéralisation des os Absorption intestinale du calcium et stabilité de son taux
E	1 UI (3% des AJR) : 0.5 à 1.9 mg	Antioxydant : membrane et lipoprotéine
K	0.2 mg (300% des AJR)	Coagulation sanguine Fixation du calcium

➤ **Les vitamines hydrosolubles :** Les vitamines hydrosolubles B1, B2, B3, B5, B6, B8, B9, B12, (**Tab. 07**) ne sont pas stockées par l'organisme mais éliminées par le rein et dans la sueur donc si les besoins journaliers ne sont pas satisfaits les réserves s'épuisent. Selon la provenance de la spiruline, la vitamine C est soit absente soit en quantité négligeable. (Manet, 2016).

Tableau 07: Teneur moyenne et principales fonctions des vitamines hydrosolubles de la spiruline (Manet, 2016).

Vitamines hydrosolubles	Teneur moy/10g de spiruline	Principales fonctions
B1 (thiamine)	0.35 mg (30% des AJR)	-Transmission influx nerveux -Métabolisme des glucides
B2 (riboflavine)	0.35 mg (21% des AJR)	-Production d'énergie par le métabolisme des glucides et lipides. -Croissance des tissus (peau et muqueuses) -Vision
B3 (niacine, PP)	1.46 mg (9% des AJR)	-Production d'énergie -Transmission de l'influx nerveux
B5 (panthoténate)	0.5-10mg (10% des AJR)	-Croissance des tissus (peau, cheveux, muqueuses) -Favorise la production d'énergie
B6 (pyridoxine)	0.08 mg (5% des AJR)	-Synthèse des neurotransmetteurs -Métabolisme des protéines
B8 (biotine)	0.5 μ g (0.5% des AJR)	-Métabolisme : protéines, lipides, glucides -Synthèse des vitamines B9 et B12
B9 (acide folique)	0.01 mg (2.5 % des AJR)	-Renouvellement de toutes les cellules -Synthèse des neuromédiateurs

		-GR et oxygénation cellulaire
B12 (cobalamine)	0.015-0.032 (1000% des AJR)	-Formation des GR (anti anémique) -Renouvellement cellulaire

a) **Vitamine B12** : C'est la vitamine la plus difficile à obtenir dans un régime sans viande, car aucune plante commune la contient. C'est pourquoi que la plupart des cas de carence en vitamines B12 dus à une régime végétarien strict.

La teneur en vitamine B12 est très élevée, elle est quatre fois plus riche que le foie cru (Falquet et Hurni, 2006).

Une dose de 10 grammes de spiruline peut répondre aux besoins quotidiens des enfants de 486% (Hug et von der Weid, 2011).

b) **Vitamine A** : La vitamine A est très essentielle à tous les âges. Maintenant, son rôle principal dans le mécanisme de la vision a été clairement déterminé, Aussi dans la croissance des cellules, renouvellement des tissus (peau, muqueuse intestinale), système immunitaire ... etc. (Cruchot, 2008).

c) **Vitamine E** : Les tocophérols sont des composés liposolubles qu'on regroupe sous le terme de vitamine E, aide à neutraliser les radicaux libres qui peuvent s'accumuler dans les membranes lipidiques. Elle agit comme un antioxydant essentiel dans la protection des membranes cellulaires. La teneur en vitamine E de la spiruline présente une forte variabilité liée probablement à des qualités de spiruline différentes, avec un moyen de 50 à 190 mg/Kg de masse sèche, ce qui est comparable à celle de graine de blé considéré comme la référence sur le plan de l'apport en cette vitamine (Cruchot, 2008).

1.5. Pigments

La teneur en pigments de la spiruline varie suivant les souches et le milieu de culture. La spiruline contient de nombreux pigments qui lui permettent de capter différents spectres solaires et d'en stocker l'énergie. Ils sont à l'origine des nombreuses propriétés attribuées à la spiruline. Les pigments présents dans la spiruline sont regroupés dans (Tab. 08) ci-dessous :

Tableau 08 : Teneur moyenne et principales fonctions des pigments de la spiruline (Vidal, 2008; Liu *et al.*, 2016; Manet, 2016; Furmaniak *et al.*, 2017).

Pigments	Teneur moy/10g de spiruline	Principales fonctions
Caroténoïdes : -Lutéine -Zéaxanthine -β-carotène	0,2 mg 11 mg 15à 24 mg (1000% des AJR)	-Vision - Vision -Croissance, Vision, Antioxydant
Chlorophylle	60 mg	-Chélateur des métaux lourds -Protecteur digestif
Phycocyanine	100-160 mg	-Antioxydant, anti-inflammatoire -Immunostimulant, anti tumoral

a) **Caroténoïdes (pigments jaune-orange)** En ce qui concerne les caroténoïdes, le β carotène (pro vitamine A) est un précurseur de la vitamine A. Elle représente 40 à 80% des caroténoïdes de la spiruline. Le reste est composé de cryptoxanthine, de xanthophylle, d'échinénone, de zéaxanthine et de lutéine. Les caroténoïdes étant très sensibles à l'oxydation, il est important de tenir compte des procédés de séchage (Falquet et Hurni, 2006).

La consommation de 5g par jour de spiruline apporte 7 à 8,5 mg de β-carotène alors que la limite d'apport quotidienne de celle-ci est estimée à 7 mg/j (Anses, 2017).

b) **La chlorophylle** a hauteur de 1 % de la masse sèche, pigment responsable de sa coloration verte. Si les plantes l'utilisent pour la photosynthèse, elle permet au corps humain de capter le magnésium organique nécessaire au maintien de l'équilibre acido-basique. Sa structure moléculaire ressemble à l'hémoglobine mais la molécule centrale est le magnésium et non le fer.

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. Cependant la chlorophylle est détruite à haute température d'où l'importance d'un séchage à basse température (Patel et Goyal, 2013).

c) **La phycocyanine** responsable de la coloration bleue représente entre 12,6 % et 20% du poids sec selon les sources (Patel et Goyal, 2013).

Cette protéine qui n'est retrouvée que dans la spiruline, contient un noyau renfermant un ion fer et un ion magnésium, et est donc considérée comme le précurseur de l'hémoglobine

(noyau avec un ion fer) et de la chlorophylle (noyau avec un ion magnésium), à la charnière entre le monde végétal et animal. Elle fait l'objet de nombreuses recherches abordées plus loin.

1.6. Enzymes

Les enzymes sont des protéines produites naturellement par l'organisme et intervenant dans la catalyse de nombreuses réactions chimiques. On en retrouve plusieurs dans la spiruline dont la principale est la superoxyde dismutase (SOD) (1.000 à 4.000 UI/g). Il s'agit d'une enzyme au fort pouvoir antioxydant intervenant dans la défense de l'organisme contre les radicaux libres (Falquet et Hurni, 2006).

1.7. Minéraux et oligo-éléments

Les minéraux particulièrement intéressants de la spiruline sont le fer, le zinc, le magnésium, le calcium, le phosphore et le potassium. (Tab. 09)

- **Le fer :** Le fer contenu dans la spiruline montre un taux d'absorption six fois plus élevée que celui de la viande (Puyfoulhoux *et al.*, 2001). A titre de comparaison, les céréales classées comme la meilleure source de fer ne contiennent que 150 à 250 mg / kg, contre 600 mg/Kg pour la spiruline. Ce pourcentage peut être décuplé dix fois par enrichissement spécifique de milieu. Donc la spiruline pourrait représenter une source adéquate de fer.

- **Le zinc :** Il est clair que le zinc affecte de multiples aspects du système immunitaire, et les personnes souffrant d'une carence en zinc sont plus sensibles à divers agents pathogènes (Shankar et Prasad, 1998). La spiruline ne contient généralement que de 2.1 à 4.0 mg/100g. À ces niveaux, la spiruline ne peut pas être consommée comme source de zinc, notamment qu'un adulte a besoin au moins 15mg de zinc chaque jour. Mais, par enrichissement du milieu, cette valeur peut être élevée à des niveaux supérieurs jusqu'à 6 mg/g (Falquet et Hurni, 2006).

- **Le magnésium et le potassium :** Les produits d'origine animale, les fruits et légumes et certaines eaux minérales constituent de bonnes sources de magnésium dans l'alimentation. Mais en raison de la présence de l'acide phytique, elle n'est pas facilement

absorbée. Il convient de noter que la carence en magnésium provoque également une carence en potassium, qui ne sera plus absorbé par l'organisme.

L'absence de l'acide phytique dans la composition de la spiruline. Et sa richesse en magnésium, chlorophylle et potassium (presque 50% de besoins quotidiens) la rendent l'une des meilleures sources naturelles de ces minéraux (**Falquet et Hurni, 2006**).

- **Le calcium et le phosphore** : La teneur en calcium et en phosphore est équivalente à celle du lait. Leurs quantités étant équilibrées, ils permettent un maintien de l'état osseux en réduisant le risque de décalcification (**Ahounou, 2018**).

- **Le sélénium** : Le sélénium est un microélément essentiel qui intervient dans la protection contre les espèces oxygénées réactives. Il semble impliqué dans l'élimination des acides gras peroxydés et, en association avec la vitamine E, dans la destruction des radicaux libres, c'est donc un antioxydant.

Les doses quotidiennes recommandées pour l'adulte sont de 50 µg mais on considère généralement que la limite supérieure de sécurité se situe vers 400 µg. Une toxicité chronique (sélénose) apparaît systématiquement vers 5000 µg /jour.

Il n'y a pratiquement pas de sélénium dans la spiruline naturelle mais il est possible d'enrichir la spiruline en sélénium par addition de sélénite de sodium au milieu de culture (**Chen et al., 2006**)

Des essais de supplémentation menés sur des rats artificiellement carencés en sélénium ont abouti à la conclusion que la spiruline enrichie en cet élément était une excellente source de sélénium. La biodisponibilité du sélénium de la spiruline est élevée, quoique moindre que celle du sélénite de sodium.

- **L'iode** : La carence en iode provoque chez l'enfant de graves et irréversibles troubles du développement. Le risque de carence en iode concerne environ un milliard de personnes sur notre planète, c'est la première cause de maladie mentale évitable (**Hetzl et Pandav, 1997**).

Les apports quotidiens recommandés en iode sont de 50 µg pour les enfants de moins d'un an, environ 100 µg entre 1 et 10 ans, puis environ 130 µg. Ces apports recommandés s'élèvent à 175 µg pour la femme enceinte et 200 µg pendant l'allaitement.

Il est possible d'obtenir des souches de spiruline capables de fixer l'iode mais les sels d'iodes sont chers et la spiruline ne semble pas concentrer activement cet élément. (Lison et al., 2001). Les minéraux et les oligoéléments présents dans la spiruline sont regroupés dans tableau 09 ci-dessous :

Tableau 09 : Teneur moyenne et principales fonctions des minéraux et des oligoéléments de la spiruline (Manet, 2016).

Minéraux et Oligoéléments	Teneur moy/10g de spiruline	Principales fonctions
Calcium	130 mg (10% des AJR)	-Édification et renouvellement du squelette -Rythme cardiaque, système nerveux
Phosphore	67 mg (8 % des AJR)	-Masse minérale du squelette osseux -Réactions biochimiques de l'organisme
Fer	7-18 mg (50 à 100% des AJR)	-Fabrication et fonctionnement de l'hémoglobine -Constitution de myoglobine
Zinc	0.4 mg (4% des AJR)	-Activation de plus de 200 enzymes
Magnésium	25-50 mg (9 à 25% des AJR)	- Masse minérale du squelette osseux -Métabolisme glucidique et lipidique (muscle, coeur, axe nerveux)
Potassium	100-200 mg (5-10% des AJR)	-perméabilité des membranes - régulation du rythme cardiaque
Sodium	0.09 mg	-Régulation pression osmotique -Maintien de l'équilibre hydro-électrolytique et de la masse hydrique
Sélénium	0.1-2.55 mg (20-100% des AJR)	-Cofacteur des enzymes anti oxydantes -Stimulant de l'immunité
Cuivre	0.1mg (5% des AJR)	-Cofacteur de nombreuses enzymes -Anti-inflammatoire, antioxydant
Manganèse	0.4 mg (12% des AJR)	-Formations des os et des enzymes -Métabolisme protéines, lipides, glucides -Stabilise taux de glucose sanguin
Chrome	0.03-0.25 mg (16% des AJR)	-Métabolisme glucides, lipides, acides nucléiques, cholestérol

2. L'intérêt thérapeutique de la spiruline

Ce micro-organisme contenant de nombreux éléments importants telle que les protéines, les vitamines, la phycocyanine le fer et le bêta-carotène avec des quantité exceptionnelles. De nombreux avantages pour la santé résultent de sa richesse, elle possède des propriétés anti-inflammatoire, immunomodulateurs, antiviral, antibactérien et antianémique, elle nous offre également des effets sur le cancer, le diabète et l'obésité

(Banakar *et al.*, 2020) elle s'est avérée efficace pour lutter contre la malnutrition, pour favoriser le rétablissement, lors d'une convalescence, ou pour accompagner l'entraînement des sportifs. Ses nombreuses vertus font d'elle un aliment très apprécié.

2.1. Effet hypocholestérolémiant

Le cholestérol, indispensable à la composition et à la souplesse des membranes cellulaires, est aussi précurseur des hormones stéroïdes. Mais deux de ses lipoprotéines : à faible densité (LDL) et à très faible densité (VLDL) sont athérogènes et donc facteur de risque des maladies cardio-vasculaires alors que la lipoprotéine à haute densité (HDL) est protecteur du développement de l'athérosclérose et permet le transport inverse du cholestérol.

Les maladies cardio-vasculaires sont la première cause de mortalité dans les pays développés comme en France avec 180.000 décès par an. Elles ont de nombreux facteurs de risques (âge, sexe, excès de cholestérol, hypertension, diabète, tabagisme, sédentarité, stress, mauvaise alimentation....) dont certains peuvent être prévenus grâce à la spiruline. En effet, son action sur les lipides plasmatiques, cholestérol total, HDL et LDL est l'une des plus étudiées. Ces essais sont prometteurs et commencent à toucher un grand nombre de sujets.

C'est la richesse de la composition de la spiruline qui lui procure un effet hypolipémiant : la phycocyanine augmente la réabsorption des acides biliaires au niveau de l'iléon, les caroténoïdes, l'acide γ -linoléique, les fibres et stérols font diminuer l'absorption jéjunale et iléale du cholestérol et inhibent l'expression de la HMG-CoA Réductase (3-hydroxyle 3 methylglutaryl CoA Réductase) hépatique, enzyme responsable de la biosynthèse du cholestérol. Les acides gras essentiels abaissent le taux de cholestérol, diminuent la formation de la plaque d'athérome et le risque d'infarctus. Ils augmentent la flexibilité des membranes. L'acide γ -linoléique, précurseur des prostaglandines dont la PGE1, régule la tension artérielle et le ralentissement de la production de cholestérol. De plus, la spiruline contient de la vitamine PP encore appelée acide nicotinique qui est une vitamine hypocholestérolémiante. (Dupire, 2011).

2.2. Rôle anti-inflammatoire

L'effet anti-inflammatoire de la spiruline a été étudié dans l'arthrite induite par le zymosane chez la souris. Après 8 jours d'administration, le taux anormal de β -glucuronidase dans le liquide synovial a été mesuré et noté "diminué". Une inhibition de la réaction

inflammatoire, sans aucun dommage aux chondrocytes a été observée. On a supposé que la phycocyanine fût le composant exerçant l'effet antiarthritique (**Remirez et al., 2002**).

L'effet de l'extrait de polysaccharide de *S. platensis* a été évalué sur la néovascularisation cornéenne à la fois *in vivo* et *in vitro*. L'application topique du polysaccharide a considérablement inhibé la formation de nouveaux vaisseaux dans le modèle de brûlure alcaline de la cornée. Les résultats suggèrent que le polysaccharide peut être efficace dans le traitement des opacités cornéennes impliquant une néovascularisation et une inflammation (**Patel et Goyal, 2013**).

2.3. Renforcement du système immunitaire

La spiruline renforce le système immunitaire car elle combat l'asthénie en apportant tous les nutriments pour permettre au système immunitaire de se reconstituer lors de convalescence et elle stimule le système immunitaire (thymus) et augmente la production de nouvelles cellules sanguines, améliore l'activité phagocytaire des macrophages et accélère la production du système humoral (anticorps et cytokines).

Ces affirmations sont confirmées par des études sur plusieurs animaux modèles comme les souris, rat, poussin, poisson-chat, crevette... Une augmentation de la production d'anticorps, de cellules de la rate et du thymus, de l'interleukine IL-1 et une amélioration de la phagocytose, de la réponse des cellules T et des cellules NK, et une augmentation des IgA intestinales chez la souris sont observées.

Tout cela conduit dans une expérience chez des poussins à une diminution significative de la charge bactérienne dans le groupe nourri par de la spiruline. Cet effet sur le système immunitaire semble dû à une augmentation de l'activité des macrophages d'induire les cellules présentatrices d'antigène, et de stimuler la production de cytokines (**Houston, 2002**).

Et sur des cellules humaines *in vitro*, il a été démontré une augmentation de la sécrétion des interleukines IL-1 et IL-4, de l'interféron- γ par la phycocyanine C ainsi qu'une augmentation du nombre de cellules NK, pouvant ainsi aider à lutter contre des pathogènes. (**Park et al., 2008**)

2.4. Activité antibactérienne et antivirale

La spiruline, comme de nombreuses autres espèces de cyanobactéries, présente de puissantes activités antibactériennes contre les bactéries pathogènes. L'administration de spiruline a entraîné une augmentation de la clairance bactérienne (*E. coli* et *Staphylococcus aureus*) 30 minutes après l'injection, et le nombre de bactéries dans le sang était presque négligeable. Les propriétés antivirales sont observées à de faibles concentrations ou la spiruline a réduit la réplication virale tout en bloquant la réplication à des concentration élevées (**Jung et al., 2019**) 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 virus de la rougeole, le virus des oreillons, le virus de la grippe A et le VIH-1 (**Hayashi et al., 1996 ; Sansone et al., 2020**). Ils présentent également un antifongique fructueux contre *S.candida albican*(**Banakar et al., 2020**).

2.5. Propriétés antioxydantes

Des études *in vivo* et *in vitro* ont montré les effets antioxydants de la spiruline procurés par diverses molécules telles que la C-phycoyanine, les β -carotènes, les tocophérol, l'acide C-linolénique et les composés phénoliques.

Ces composés antioxydants produits par la cyanobactérie peuvent prévenir ou retarder le dommage oxydatif en réduisant l'accumulation de ROS49 à travers l'activation des systèmes d'enzymes antioxydantes de la catalase (CAT), superoxyde dismutase (SOD) et glutathion peroxydase (GPx).

Chez *Spirulina maxima*, les composés phénoliques responsables de l'activité antioxydante sont des acides organiques (ex : caféiques, chlorogéniques, salicyliques...) qui agissent individuellement et de manière synergique.

Au niveau des biomasses de spiruline, des activités antioxydantes des phycobiliprotéines, phycocyanine et allophycocyanine, ont été démontrées. La C-phycoyanine possède la capacité d'éliminer les radicaux libres, de diminuer la production de nitrites, de supprimer l'expression de l'oxyde nitrique synthase inductible (iNOS) et d'inhiber la peroxydation lipidique microsomale du foie. Le β -carotène de la spiruline possède également une activité antioxydante : il protège contre l'oxygène singlet médié par la

peroxydation lipidique. De plus, la spiruline exerce un effet protecteur contre le stress oxydatif causé par l'acétate produit dans le foie et le rein chez les rats (**Goulambasse, 2018**).

2.6. Propriétés anti-cancer

L'étude de (**Mathew et al., 1995**), menée chez des chiqueurs de tabac atteints de leukoplakia orale en Inde, a montré qu'une discontinuation de la supplémentation en spiruline entraînait des lésions récurrentes chez plus de la moitié des sujets. Une étude animale a montré que l'ingestion d'extrait de spiruline et de *Dunaliella* inhibait chimiquement la carcinogénèse dans la cavité buccale.

Les effets anti-cancer de la spiruline ne sont pas encore bien connus et pourraient être dus aux β -carotènes (notamment dans la prévention du cancer de la peau) et au Spirulane-calcium. En effet, ce dernier est responsable de l'inhibition de l'invasion tumorale et des métastases. Chez *S. platensis*, l'extrait polysaccharidique présente des capacités chémo- et radio-protectrices, d'où une potentielle utilisation dans les thérapies cancéreuses.

La C-phycoyanine inhibe de manière sélective la COX-2, sans affecter la COX-1. Or, les enzymes COX sont surexprimées dans de nombreux cancers du sein. Une inhibition de la COX-2 par la spiruline permettrait donc de réduire la croissance de la tumeur et d'inhiber l'angiogénèse. De plus, les expériences in vitro menées par (**Choi et al., 2013**), ont montré que des extraits de *S. maxima* supprimaient efficacement l'expression de Bcl2 (protéine anti-apoptotique).

2.7. Propriétés antidiabétique

Le diabète se caractérise par une hyperglycémie chronique, c'est-à-dire un excès de sucre dans le sang et donc un taux de glucose (glycémie) trop élevé. Il existe deux types de diabète : le diabète de type 1 qui correspond à une incapacité du pancréas à produire de l'insuline et le diabète de type 2 qui correspond à une quantité insuffisante et inopérante d'insuline. Riche en acide gamma-linolénique (acides gras essentiels) et en polysaccharides (forme de glucides), la spiruline pourrait être un régulateur du taux de sucre dans le sang (glycémie) et favoriser ainsi l'équilibre du diabète. Différents cas ont été observés dans différents pays pour nous montrer les prouesses de cette micro-algue bleue. Selon une étude publiée par le Dr. ZX Huang de l'École des sciences pharmaceutiques à Guangzhou, en Chine, ce super-aliment diminue la glycémie, le cholestérol total, les triglycérides et améliore

le cholestérol HDL chez les animaux diabétiques. Cette étude a été publiée dans le numéro de Février 2005 de “China Journal of Materia Medica chinese.” Cela a été confirmé par une étude mexicaine mettant en évidence que la baisse des taux de glycémie, de triglycérides et de cholestérol pouvait être constatée dès le sixième jour de traitement à la spiruline chez des rats diabétiques. Une équipe indienne a aussi constaté, après trente jours de traitement à la spiruline, une diminution significative du taux de glucose, une amélioration sensible du profil lipidique et des marqueurs hépatiques, et un niveau élevé de lipoprotéines de haute densité. **(Manet, 2016)**

2.8. Activité Antianémique

L'anémie est en fait un manque de globules rouges ; par rapport aux valeurs normales, les taux d'hémoglobine (HB) sont trop faibles. Elle est définie par l'OMS par une concentration d'hémoglobine inférieure à 130 g/l de sang chez l'homme adulte et à 120 g/l de sang chez la femme **(Bourquin et Martin, 2006)**.

Les valeurs varient en fonction de l'état de santé général, l'âge et le sexe. Généralement elle est causée par une alimentation incomplète, déséquilibré ou insuffisant.

Donc, il y a une forte association entre la malnutrition et l'anémie, dans les cas plus graves, la malnutrition peut être causé la mort, elle présente un problème véritable dans les pays sous-développés. Une énorme quantité de vitamines, minéraux, protéines présentes dans la spiruline devrait aider à traiter l'anémie et lutter contre la malnutrition chez les enfants sous-alimentés en augmentant le volume de sang et le nombre de cellules sanguines **(Sinha et al., 2018)**.

Dans une étude clinique sur 91 filles de 11 à 13 ans traité par la spiruline pendant 6 mois avec une posologie de 900 mg/jour, les résultats représentent dans l'augmentation significative le taux d'hémoglobine passant de $117,13 \pm 12,50$ à $128,28 \pm 12,99$ g/l, de la ferritine, Gain de poids de plus de 2 kg pour 90 % d'entre elles et de plus de 3 kg pour plus de 75 % **(Manet, 2016)**.

La teneur en fer très élevée de la spiruline doit être soulignée, parce que l'anémie ferriprive est très répandue, en particulier chez les femmes et les enfants, et les sources alimentaires de fer sont rares. en revanche, les céréales (la meilleure source de fer) ne contiennent que 150 à 250 mg / kg **(Ahounou, 2018)**.

2.9. Effet antihypertenseur

Des études *in vitro* montrent que la phycocyanine C agit de plusieurs façons pour diminuer la tension artérielle. Elle est considérée comme un antagoniste des récepteurs de l'angiotensine II au niveau central et elle augmente la bio-efficacité de NO, l'oxyde nitrique, une substance vaso-relaxante au niveau central et périphérique et elle bloque la NADPH oxydase, complexe enzymatique qui intervient notamment dans la synthèse d'angiotensine II.

Cette diminution de la tension artérielle a été également observée *in vivo* chez des rats hypertendus, l'extrait de phycocyanine C diminuant la tension de manière dose dépendante (Ichimura *et al.*, 2013). Sur des anneaux aortiques de rat, l'administration quotidiennement de spiruline pendant deux semaines a conduit à une diminution du tonus vasculaire en augmentant la libération de NO (Houston, 2002).

2.10. Traitement à l'empoisonnement chronique à l'arsenic

Des millions de personnes au Bangladesh, en Inde, à Taïwan et en Chine sont à risque d'empoisonnement chronique à l'arsenic via l'ingestion d'eau à forte concentration d'arsenic. Une étude a été menée par (Misbahuddin *et al.*, 2006) sur des patients atteints durant 16 semaines, afin d'observer l'efficacité de l'ingestion quotidienne de spiruline couplée au zinc dans le traitement de cet empoisonnement chronique à l'arsenic. Il en résulte que des extraits de spiruline additionnés de zinc consommés quotidiennement pourraient être utiles pour le traitement de l'empoisonnement chronique à l'arsenic avec des mélanoses et kératoses.

2.11. La Spiruline dans la spermatogénèse

Spirulina platensis affecte les facteurs impliqués dans la spermatogénèse et augmente les récepteurs de ghréline dans le tissu testis des rats nourris par un régime hautement gras. En effet, la ghréline est une hormone peptidique qui joue un rôle important dans le maintien de la libération de l'hormone de croissance et de l'homéostasie énergétique chez les vertébrés.

Spirulina platensis (SP) a des effets antioxydants et hypolipémiants dus à ses ingrédients. Dans cette étude, le but était d'étudier les effets de SP sur la structure testiculaire et la relation entre la ghréline et la testostérone dans les testicules de rats nourris avec un régime riche en graisses (HFD) (Esener *et al.*, 2017).

2.12. Effet antiallergique

La prévalence des maladies allergiques, asthme, dermatite atopique, rhinite allergique a augmenté au cours des 20 dernières années. L'allergie est un phénomène de réaction immunitaire anormale envers certaines protéines étrangères (aliment, médicament, pollen, acarien, venin d'insecte...). Lors de cette réaction immunitaire il y a libération d'immunoglobulines et notamment de forte quantité d'IgE. Or la prise quotidienne de 5 g de spiruline pendant 45 jours chez des enfants a démontré une diminution des taux d'IgE et d'histamine, des réactions allergiques ainsi qu'une diminution de 50% de la sensibilité aux pollens (Evets et coll, 1994).

Concernant la dermatite atopique, ou eczéma atopique, des études ont montré que l'acide γ -linoléique a de très bons résultats sur l'eczéma atopique (Pascaud, 1993) en stimulant les défenses immunitaires. Contre l'asthme, maladie inflammatoire des voies aériennes supérieures, la prise de spiruline a montré plusieurs avantages et chez le rat : elle permet de réduire les phénomènes allergiques en inhibant la production d'histamine par les mastocytes et la production d'acide arachidonique, molécule à l'origine de la formation des leucotriènes qui déclenchent le bronchospasme (Kim *et al.*, 1998).

2.13. La malnutrition

D'après le rapport « Progres pour les enfants : un bilan de la nutrition » publiée par l'UNICEF en 2006 (Unicef, 2006), dans les pays en développement, plus d'un quart des enfants de moins de cinq ans présente une insuffisance pondérale, soit 146 millions d'enfants. En 2006, près de 9,7 millions d'enfants sont morts avant l'âge de 5 ans et la dénutrition a contribué à plus de la moitié de ces décès.

La composition de la spiruline étudiée plus haut, montre clairement qu'elle est un aliment protéique riche apportant une grande quantité de vitamines, minéraux et acides gras insaturés tout ceci pour une faible valeur calorique. Traditionnellement elle a été consommée en association avec des céréales ce qui en faisait un aliment approprié pour traiter la malnutrition protéique et énergétique.

Se servant de cet exemple, une des solutions pour lutter contre la malnutrition peut résider dans une simple capsule contenant un ou plusieurs grammes de spiruline administrée en complément à l'alimentation de l'enfant. Pour exemple, un programme de supplémentation

a l'aide de capsules de vitamines A existe déjà. Ne coûtant que quelques centimes et administrée pendant une campagne de vaccination, ce programme sauve à l'heure actuelle 350000 vies par an en aidant à renforcer le système immunitaire. D'autres exemples d'enrichissement d'aliments de base avec des nutriments clés comme le fer et l'iode ont fait leurs preuves pour protéger des millions d'enfants contre les carences et les retards du développement. Il peut en être de même avec la spiruline d'autant plus que son acceptation par les humains peut être augmentée en l'utilisant mélangée avec de la nourriture sachant qu'ajoutée à une dose de 1g par portion, elle n'altère pas le goût (**Charpy et al., 2004**).

2.14. Effet anticoagulant

In vitro, l'effet de la spiruline sur la coagulation a été comparé à l'héparine et il en ressort que la spiruline inhibe l'agrégation plaquettaire (1^{ère} phase de l'hémostase) mais aussi la coagulation (2^{ème} phase), la spiruline rallonge le TP (temps prothrombine) et le TCA (temps de céphaline activée) donc la voie extrinsèque et la voie intrinsèque (surtout) de la coagulation sont impliquées et plus la concentration en spiruline augmente et plus la coagulation est retardée (**Loke et al., 2007**).

2.15. Pathologies digestives

Près de 7 français sur 10 souffrent de pathologies digestives de manière intermittente ; diarrhées, constipation, ballonnements... Chez le rat, la spiruline augmente par 4 (+186 %) la production de bactéries lactobacilles or chez l'homme ces lactobacilles sont indispensables à la bonne régulation du système digestif (diarrhées, constipation, ballonnements), restaurant ainsi la flore intestinale en supprimant la flore pathogène. Ces probiotiques sont très en vogue de nos jours, de plus en plus d'études leur donnent de nouvelles allégations : outre le fait d'améliorer la digestion et l'absorption des nutriments, elles permettent de renforcer les défenses immunitaires, de protéger des infections gastrointestinales, de la prise d'antibiotiques, des allergies, des MICI... (**Kim et al., 2008**).

Chez le rat, la spiruline stimule la digestion et l'élimination de bactéries digestives telles que *E. coli* ou des *Candida* (tel que *Candida albicans*) grâce aux lactobacilles et bifidobactéries, elle normalise la sécrétion des sucs gastriques apaisant les brûlures. Enfin la chlorophylle pourrait cicatrifier la muqueuse digestive lors d'ulcères (**Kim et al., 2008**).

3. Autres effets bénéfiques de la spiruline

3.1. Activité musculaire et aide au sportif

Une première étude a été effectuée par Lu et Coll., en 2006 sur 16 étudiants non entraînés. Les étudiants ont été divisés en deux groupes : expérimentale et contrôle. Le premier groupe est supplémenté par 7,5 g de spiruline et l'autre par 7,5 g de protéines de soja pendant trois semaines. Après une course de 30 minutes sur un tapis roulant, les résultats montrent une diminution de la concentration de MDA avec une augmentation de la SOD et de la concentration en lactate, les autres marqueurs de l'oxydation GPx, LDH étaient diminués et le temps d'épuisement était significativement prolongé avec la spiruline.

Ces résultats de suggèrent que l'ingestion de *S. platensis* a un effet préventif des lésions musculosquelettiques et induit une meilleure résistance à l'effort. (Lu *et al.*,2006).

Une autre étude contrôlée comprenait deux groupes, dont 20 participants non entraînés et 20 participants entraînés. Après une supplémentation par 2g de spiruline pendant 8 semaines, une mesure de la force du quadriceps a été effectuée. On constate une augmentation de la force musculaire dans les deux groupes. Cependant les résultats semblent plus intéressants dans le cas des personnes athlétiques (Ahounou, 2018).

3.2. Effet sur la peau et les phanères

La présence d'antioxydants : vitamine A, E, B, β -carotène permettent d'avoir un joli teint, les acides gras notamment l'acide γ -linoléique apporte souplesse, élasticité et douceur à la peau, la SOD aide à oxygéner la peau et la protéger contre les dommages des UV, le β -carotène, antioxydant est photo-protecteur, protège du vieillissement lié aux UV, les vitamines du groupe B (B2, B5, B8, B12), la vitamine D, le calcium, magnésium, zinc et acides aminés sont nécessaires à la bonne croissance des phanères. Cet effet pourrait être obtenu par une prise de spiruline *per os* mais aussi en application locale, en cataplasme, ou dans les cosmétiques permettant d'absorber les impuretés, nettoyer la peau, hydrater et donner un teint éclatant. En effet, les laboratoires cosmétiques recherchent la formule antiâge la plus complète et la plus efficace, or la spiruline contient des actifs pour nourrir la peau, des actifs antioxydants, cicatrisants, détoxifiants, régénérant, antirides, antidessèchement c'est pour cela qu'elle est utilisée par certaines marques de cosmétiques (Manet, 2016).

3.3. Perdre du poids

La spiruline offre un véritable avantage à ceux qui ne consomment pas de viande, mais également pour ceux qui manquent de minéraux essentiels dans leur alimentation (**Mehandru et Dandekar, 2008**) . Sa richesse en protéines permet à l'organisme de ressentir plus vite la satiété. De cette façon, elle aide à diminuer les quantités de nourriture dans l'assiette et à supprimer le grignotage entre les repas. Un avantage certain pour celles et ceux qui cherchent à perdre quelques kilos et à bénéficier d'une bonne ration quotidienne de vitamines. Cette cyanobactérie favorise également la détoxification de l'organisme. De nombreux diététiciens recommandent la spiruline pour mincir en raison de sa capacité à agir comme un coupe-faim efficace, notamment grâce à sa richesse en protéines (**Wershil et Furuta, 2008**)

3.4. Lutte contre la fatigue

Bien qu'il n'existe pas encore d'études à grande échelle sur les effets de la spiruline sur la fatigue dite "chronique", sa composition avec sa teneur exceptionnelle en nutriments indispensables, sa grande assimilabilité, son effet stimulant sur le système immunitaire, et ses pouvoirs détoxifiants, a donné d'excellents résultats sur les formes simples de fatigue. L'EFSA autorise d'ailleurs les marques à utiliser les notions d'aide en cas fatigue, de tonus, de vitalité, etc. : ce sont des allégations autorisées pour la spiruline. [10]

Une étude publiée en 2016 a évalué les effets d'une supplémentation quotidienne avec 3g de spiruline pendant 8 semaines sur la fatigue physique et intellectuelle de 17 hommes en bonne santé. Les performances intellectuelles ont été améliorées dès 4 heures suivant la première prise de spiruline, l'amélioration ayant perduré pendant les 8 semaines de l'étude. Sur le plan physique, une amélioration significative est apparue une semaine après la première prise de spiruline. Ils ont également fait état d'une diminution de leur sensation de fatigue qu'ils ont commencé à percevoir 4 heures après la première prise de spiruline et qui a, en outre, duré jusqu'à la fin de l'étude.(**Johnson et al., 2016**)

3.5. Accompagnement de la femme enceinte et allaitante

Si les tests d'efficacité sur les animaux sont nombreux ce n'est pas le cas pour les tests de sécurité. Cependant aucune étude clinique ne montre d'effet tératogène, génotoxique, mutagène, ou de toxicité aiguë ou chronique suite à la prise de spiruline (**Deng et Chow, 2010**).

Quatre études sur des rates gravides ont été menées à doses de spiruline de 0 à 30g de spiruline/100 g de poids avec aucun retentissement sur le foetus même sur de longues durées (6 mois). Il n'y a aucun signe embryotoxique et pendant la lactation si la prise de spiruline permet d'augmenter le taux de protéines aucun problème de sécurité n'est retrouvé (Pétrus *et al.*, 2010).

Il est nécessaire de poursuivre les recherches chez l'homme. Aucune information n'existe concernant des recommandations sur l'utilisation appropriée pendant l'allaitement. Dans la monographie de qualité se trouve une phrase à appliquer sur les compléments alimentaire : « Si vous êtes enceinte ou allaitante, demander l'avis d'un professionnel de santé avant d'utiliser ce produit », la DSI-EC préconise de ne pas utiliser la spiruline par précaution et par manque d'étude clinique chez la femme enceinte, même si aucune étude chez l'animal n'a démontrée d'effet tératogène. (Manet, 2016)

3.6. Trouble du sommeil/ anxiété/ fonctionnement cérébral

Grâce aux vitamines du groupe B, au sélénium, magnésium, et tryptophane, la spiruline permet de lutter contre le stress, la fatigue psychique, l'irritabilité, la tristesse, le pessimisme, la démotivation, la dépression, favorise le sommeil, le bien-être, l'équilibre du système nerveux, et la sénescence. Le tryptophane, précurseur de la mélatonine, et la phénylalanine favorise l'endormissement et la phase de sommeil paradoxal permettant d'obtenir un sommeil normal, profond et réparateur sans effet secondaire. De plus elle apporte et stimule la production de mélatonine. L'étudiant, dont le régime alimentaire n'est pas toujours varié et qui a une activité intellectuelle intense donc avec des besoins nutritionnels augmentés, apporte grâce à la spiruline les vitamines, minéraux, et acides gras essentiels nécessaire au bon fonctionnement cérébral, la lysine et la phénylalanine peuvent améliorer la mémorisation, la vitamine B1 présente participe à l'équilibre du cerveau et du système nerveux. (Manet, 2016)

3.7. Effet anti-âge

Le vieillissement est dû à un ensemble de facteurs : diminution de la production d'hormones, ADN endommagé, usure du corps et des cellules, présence de radicaux libres. dysfonctionnement des mitochondries, rigidité des membranes. Or la spiruline intervient dans le processus de réparation de l'ADN, elle a un fort pouvoir antioxydant, avec les vitamines A, les vitamines du groupe B et la vitamine E permettant ainsi la régénération de cellules,

notamment des cellules cérébrales. Enfin le vieillissement est dû à l'accumulation de métaux lourds (mercure, plomb, cadmium, aluminium pour ne citer que les plus dangereux). Au niveau du système nerveux central, cette accumulation entraîne démence, dépression, troubles du sommeil, perte de mémoire, déclin cognitif. La spiruline en chélatant les métaux lourds pourrait permettre de détoxifier l'organisme et limiter ces déclin. Le sélénium, le manganèse, le cuivre et le zinc permettent de lutter contre le vieillissement cellulaire. Faire régulièrement des cures de spiruline est un moyen de prévenir du vieillissement cellulaire et permet de vieillir en meilleure santé même si aucune étude clinique n'existe. (Manet, 2016)

4. Posologie de la spiruline

Les recherches effectuées sur la spiruline ne permettent pas d'indiquer un dosage thérapeutique néanmoins les bienfaits de la spiruline sont connues pour les dosages suivants :

- **Pour un adulte :** La dose doit être de 2 à 3 grammes par jour, cette dose peut être augmentée et atteindre 4 ou 5 grammes par jour pour les personnes avec des besoins spécifiques comme ceux en manque de vitamines ou ayant des carences en fer. A savoir qu'il est préférable de ne pas dépasser les 10 grammes par jour car les personnes les plus sensibles sont susceptibles d'avoir des effets indésirables comme des maux de tête ou des nausées. Il est recommandé d'augmenter l'apport en spiruline petit à petit pour que le corps s'habitue à la richesse de ces nutriments. Pour cause de sa richesse en bêta-carotène une forte dose de spiruline peut teinter vos mains de façon orangée mais pas de panique cela est réversible en diminuant sa consommation de spiruline. [11]

- **Pour les sportifs :** Ils ont des besoins plus conséquents que les personnes ne pratiquant pas d'activité sportive particulière. En effet, ils ont besoin de récupérer rapidement, et grâce au glucide contenu dans la spiruline c'est possible, et les protéines de la spiruline permettent de développer et maintenir la masse musculaire de l'athlète. Donc pour une activité physique modérée il est conseillé de prendre 5 à 8 grammes de spiruline par jour, et jusqu'à 10 grammes pour une activité intense. [11]

- **Pour les enfants entre 10 et 20 kilos :** Il est conseillé de consommer une faible quantité et de ne pas dépasser 1.5 grammes par jour. [11]

5. Effets indésirables

Plusieurs effets secondaires graves ont été décrits mais restent rares. Des études font apparaître des troubles d'ordre digestif (fréquence de 3-4 %) : ballonnements, accélération du transit. Ils surviennent surtout en début de cure et sont réversibles au bout de quelques jours. Afin de les éviter, le pharmacien peut conseiller d'augmenter progressivement la posologie les premiers jours, d'autant plus si la personne a un régime plutôt faible en fibres. D'autres effets secondaires sont possibles : des symptômes de type céphalées, fatigue, éruptions cutanées. Ces effets seraient dus à l'élimination des toxines de l'organisme et ne sont que transitoires. De la même façon, une augmentation progressive des doses permet d'éviter la survenue de ces derniers. De plus, de la fièvre ou des sueurs peuvent apparaître les premiers jours. Elles sont dues à la composition de la spiruline riche en protéines et nutriments qui font accélérer le métabolisme qui libère de la chaleur dans le corps et peut être ressentie comme de la fièvre.

Pour vérifier la sécurité de la spiruline plusieurs moteurs de recherche ont été utilisés et plusieurs agences de pharmacovigilance ont été interrogées par la DSI-EC (Dietary Supplements Information Expert Committee). Les résultats sont les suivants. **(Manet, 2016)**

1) Un cas de rhabdomyolyse a été observé chez un homme de 28 ans suite à la prise de 3 g spiruline/jour pendant un mois, les taux d'enzymes hépatiques ont augmenté (CPK, ALAT, ASAT, LDH et myoglobine) par ailleurs l'ECG est normal, les résultats sérologiques sont normaux ce qui confirme un cas de rhabdomyolyse, un trouble potentiellement mortel. C'est une maladie primaire ou une complication d'un large spectre de maladies, les autres causes peuvent être une blessure musculaire, un défaut de perfusion, des médicaments ou des toxines **(Manet, 2016)**.

2) Un cas de dermatomyosite – rougeurs des doigts, des mains et du visage – dans les deux jours suivant la prise de spiruline, la spiruline étant immunostimulante elle peut précipiter des troubles auto-immuns comme la dermatomyosite chez des personnes ayant des prédispositions génétiques à l'auto-immunité. Mais le lien avec la spiruline n'est pas clairement établi. **(Manet, 2016)**.

3) Un cas d'éruptions bulleuse, maladie du système immunitaire ; une femme de 82 ans a commencé à prendre de la spiruline un an avant le début de l'éruption avec cloques, bulles et macérations sur le tronc ; éruption qui a évolué sur deux ans. Le tableau clinique est rentré dans l'ordre après l'arrêt de la spiruline et un traitement par 60 mg de prednisone par

jour et un traitement topique à base de sulfadiazine d'argent et de néomycine pendant trois mois. La réaction immunitaire et l'implication de la spiruline ont été confirmées in vitro avec une augmentation de + 19 % du taux d'interféron γ (Marles *et al.*, 2011).

4) Un cas d'augmentation des enzymes hépatiques chez un homme de 52 ans prenant de la simvastatine et de l'amlopidine depuis sept mois et qui se complémente avec de la spiruline depuis cinq semaines. Le lien avec la spiruline ne peut être établi car les taux d'enzymes sont revenus à la normale lorsque tous les traitements ont été arrêtés. (Manet, 2016).

6. Conseils associés

Voici quelques conseils que le pharmacien devrait mentionner au patient lors de la délivrance de compléments alimentaire à base de spiruline :

- faire des cures de 3 semaines par mois à renouveler ;
- éviter la prise le soir à cause de l'effet stimulant ;
- avertir que la présence de pigments (phycocyanine et chlorophylle) peut colorer les selles en noir ou vert.
- conseiller une prise avec de l'eau plate froide ou tiède et non avec des jus de fruits, boissons gazeuses, thé, café ou alcool car ces boissons pourraient détériorer les nutriments et enzymes de la spiruline ;
- pour la conservation : afin de préserver la qualité nutritionnelle de la spiruline, il vaut mieux la conserver dans un milieu loin de toute source de chaleur et de lumière directe ; à l'abri de l'humidité, et la consommer dans les trois mois après ouverture en refermant correctement l'emballage après chaque utilisation. En effet sur 3 mois, aucune variation sur les teneurs en lipides, protéines et glucides n'est observée; par contre au bout de 10 mois, on peut voir une légère augmentation du pH et une diminution du taux de protéines mais rien de statistiquement significatif, la spiruline reste stable dans le temps.
- augmenter progressivement les doses en commençant à 1 g par jour pour éviter la survenue d'effets indésirables cités précédemment (Ali, 2006)

Chapitre III:
La biotechnologie de la
spiruline

Chapitre III. La biotechnologie de la spiruline

1. Définition

Selon l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE), il faut regrouper sous le terme « biotechnologie », toutes les applications de la science et de la technologie à des organismes vivants ou à leurs composantes, produits ou modélisations dans le but de modifier des matériaux, vivants ou inertes, à des fins de production de connaissances, de biens ou de services. [12]

2. Domaines d'application

Les différents domaines d'application sont respectivement symbolisés par une couleur :

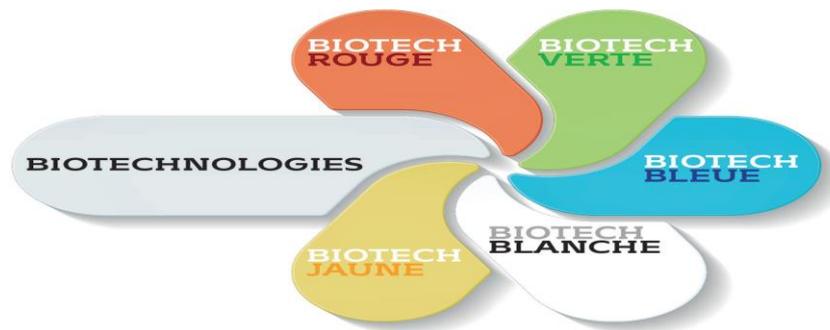


Figure 10 : Présentation des différents domaines d'application de la biotechnologie [13]

- **La biotechnologie verte** touche à l'agriculture et l'alimentation. Celle-ci utilise le génie génétique pour transférer certains gènes d'une espèce de plante à une autre et améliorer de façon ciblée la résistance aux insectes, aux champignons, aux virus et aux herbicides.
- **La biotechnologie rouge** est liée à la médecine et concerne la conception d'organismes pour produire des antibiotiques, le développement de thérapies à travers les manipulations du génome, le diagnostic à l'aide de puces à ADN ou de biocapteurs, etc.
- **La biotechnologie bleue** se concentre sur l'utilisation des processus et des organismes de la biologie marine à des fins techniques.

- **La biotechnologie jaune** rassemblent toutes les applications liées à la protection de l'environnement et aux traitements ou à l'élimination de pollution (dans les sols, les eaux...)
- **La biotechnologie blanche**, ou industrielle, a pour objet la production et les processus à l'échelle industrielle, ainsi que l'utilisation de la biomasse comme matière première renouvelable. [14]

2.1. Aspects biotechnologiques

Les propriétés nutritionnelles de *l'Arthrospira* en font une source alimentaire qui mérite une attention particulière dans les pays en développement où se pose avec acuité un problème de disponibilités alimentaires et malnutrition. C'est pourquoi il est souhaitable de développer sa production aussi bien à l'échelle domestique pour la consommation familiale qu'au niveau des lacs et étangs. Le développement de la production de spiruline devra s'accompagner de la mise au point des systèmes de culture assurant une meilleure production. (Sall *et al.*, 1999).

3. Production de la spiruline

La spiruline classée comme les microorganismes les plus cultivées au monde, La production de cette cyanobactérie a été développée de 1970 à nos jours, de quelques kilogrammes à 500 tonnes au milieu des années quatre-vingt, à environ 3500 tonnes à la fin du premier millénaire en 2012, 10000 tonnes produit dans 22 pays différents, plus de 50% de la production mondiale vient de la Chine (Usharani *et al.*, 2013 ; Manet, 2016).

La demande croissante en matière de spiruline a conduit au développement mondial et intensif d'exploitations productrices de spiruline et pour cultiver la spiruline, l'homme doit reproduire les conditions naturelles de développement et de croissance de l'algue, c'est-à-dire alcalinité et chaleur de l'eau. De plus, la concentration en minéraux de cette eau doit se situer entre 0,1 mg et 2 mg par litre et son pH sensiblement entre 9 et 11. La spiruline se développe de manière optimale lorsque la température de l'eau se trouve entre 25 et 40°C, avec un ensoleillement suffisant et une agitation régulière et douce (Guehennec, 2009)

La production de la spiruline se fait à plusieurs échelles : artisanale, semi-industrielle et industrielle. Elles se différencient par l'ordre de grandeur de l'investissement (moyens et matériaux utilisés), la surface des bassins de culture et d'exploitation, le tonnage de ces

productions et la sophistication des techniques de production. Quel que soit le mode de production, il se base sur les mêmes étapes (Charpy *et al.*, 2008).

Tableau 10 : Différentes productions de spiruline et leurs caractéristiques (Charpy *et al.*, 2008).

Production Caractéristiques	Artisanal	Semi industrielle	Industrielle
Taille des bassins	< 100 m ²	200-1000 m ²	1000 m ² - 5000 m ²
Surface totale exploitée	< 3000 m ²	3000 m ² - 1 hectare	Plusieurs hectares
Capacité de production	< 200 kg	10-50 tonnes	50 - >500 tonnes

3.1. Production artisanal

La spiruline est consommée depuis des siècles par différents peuples à travers le monde. Aujourd'hui de nombreux pays la cultivent artisanalement pour une consommation locale. Ainsi, des fermes artisanales se sont créées un peu partout dans le monde, principalement dans les pays du Tiers-monde où sévissent la famine et la malnutrition (Burkina Faso, Burundi, Cameroun, Kenya, Madagascar, Mali, Niger, Inde, Congo...). Dans ces pays, la spiruline contribue à aider les populations qui n'ont pas une diversité alimentaire suffisante, à apporter les protéines, vitamines et oligoéléments nécessaires à une nutrition équilibrée. De nombreuses ONG participent au développement local des fermes à spiruline dans le but d'apporter une solution simple et efficace à la malnutrition. La consommation de spiruline n'est pas un moyen de substitution de l'alimentation courante mais réellement un complément alimentaire riche, facile à cultiver et économiquement très avantageux pour ces peuples souvent très pauvres. Différents chercheurs, passionnés par cette algue et croyant à son potentiel pour éradiquer la malnutrition dans le monde, ont d'ailleurs écrits des ouvrages expliquant comment produire soi-même sa spiruline. Ainsi, Jean-Paul Jourdan, ingénieur en chimie et diplômé du M.I.T (Massachusetts Institute of Technology) a publié « Cultivez votre spiruline » en 1999 (revue en 2006) et Ripley D. Fox, docteur à l'université Louis Pasteur de Strasbourg et du collège Pomona en Californie a publié deux ouvrages intitulés : « *Spirulina*, production et potentiel » et « Spiruline, Technique, Pratique et Promesse » aux éditions Edisud.

Dans ce mode de culture, on utilise des systèmes qui consomment moins d'énergie, avec des moyens pas chers, simples et efficace. Selon les conditions locales, Elle est cultivée en petits bassins en bâches plastique, en dur, ou en argile couvrait avec des planches en bois, films en plastique (**Fig. 11**) ou tout autre type de toits (parfois sous serres), permettant de le protéger contre l'excès de pluies, le vent de sable, les feuilles d'arbres...etc. Ils doivent être installés d'une manière facile à vider et à nettoyer avec un system d'agitation électrique ou manuelle par roue à aubes. (**Zarrouk, 1966**).



Figure 11: Diverses cultures artisanales de spiruline. (**Jourdan ,2006**)

L'eau potable, de pluie, de puits, de forage, de mer et toutes autres sources propres et neutres peuvent être utilisée à ce niveau après avoir été filtrées, L'aliment principal de la spiruline est le carbone dont la source normale est le gaz carbonique (vient de l'air) et le bicarbonate de sodium, les autres nutriments peuvent n'être ajoutés qu'une fois par semaine (**Jourdan, 2018**). La récolte se faire manuellement par un filtre de 150µm utilisable pour l'aviculture ou l'aquaculture (**Hocini et Zebboudj. 2017**).

Toutes les règles de santé, d'hygiène et de sécurité doivent être respectées tout au long de la production afin d'obtenir un produit de haute qualité pour la consommation humaine.

3.2. Production semi - industrielle

Dans les pays en voie de développement, les fermes semi-industrielles utilisent les mêmes technologies que les fermes artisanales. Elles sont destinées à l'humanitaire et à la commercialisation. Leur objectif est d'être pérenne et autonome grâce à la vente de leur produit (Charpy *et al.*, 2008).

3.3. Production industrielle

La production à grande échelle de la spiruline pour la culture de masse doit être réalisée dans des zones où les conditions climatiques sont favorables, il est difficile d'avoir une croissance idéale en raison de différents facteurs environnementaux, en particulier la température et le soleil tout au long de l'année. Elle est souvent destinée vers la production de compléments alimentaires, mais, plus récemment, une attention particulière a été accordée à *Arthrospira platensis* en tant qu'une source potentielle de produits pharmaceutiques (Usharani *et al.*, 2013).



Figure 12: Bassins améliorés à Hawaï [15]

Les bassins ouverts sont moins chers, ils s'étendent sur de grandes surfaces et utilisent les rayons de soleil ce qui fait économiser des coûts supplémentaires au producteur (Fig. 12). Le problème posé par ce type de bassins est qu'ils restent toujours soumis à la poussière, les insectes, les pluies, les animaux ...etc. Elle doit donc subir un processus de filtrage efficace,

et être complètement protégé contre l'accès d'animaux ou de tout étranger. C'est pourquoi il est préférable de construire les bassins sous serres, en tout cas, chaque lot de production n'est vendu qu'après contrôler et assurer sa qualité.

La spiruline est placée dans les conditions optimales aussi strictement que possible, les producteurs utilisent la recherche scientifique pour atteindre cet objectif. Les bassins de production (**Fig. 13**), les lampes d'éclairages, les ventilateurs, les pompes d'eaux, le système de chauffage, et tous autres équipements industriels sont construits et placés selon des normes et des conditions très saines. Chaque fabricant à ce niveau doit disposer d'un laboratoire pour suivre chaque étape ainsi que pour contrôler la qualité de chaque lot de production. (**Usharani et al., 2013**).



Figure 13: Exemples de bassins de spiruline [15].

Afin de maximiser le rendement de production, les chercheurs ont amélioré un système permet la culture de spiruline en photobioréacteurs (**Fig. 14**), (des équipements dans lequel on cultive des micro-organismes pour faciliter le contrôle de milieu, les conditions, la surveillance et la gestion de culture), grâce à ces appareils, il est devenu possible de cultiver la spiruline durant toute l'année, même dans les climats tempérés trop froids et dans les conditions optimales (**Sguera, 2008**).



Figure 14: Photos d'une unité de production de microalgues par photobioréacteurs [16]

4. Culture de la spiruline

4.1. Bassins de culture

De tailles variables, il existe de nombreuses manières de construire un bassin adéquat. De manière générale, ils ne doivent pas comporter d'angle vifs mais plutôt des formes arrondies avec des fonds aussi plans que possible, et une légère pente vers un endroit plus creux d'accès facile pour faciliter la vidange. Ils peuvent être faits de bâches plastiques de qualité alimentaire ou au moins non toxiques. D'autres conditions doivent être respectées en ce qui concerne l'épaisseur, la composition, l'absence de plastifiant, la résistance aux UV ou la constitution en bétons durs (**Jourdan, 2014**).

Les bassins de la ferme Hyes s'étendent sur 200m². Ils sont faits de sable et de bâches et permettent une récolte annuelle de 120 à 150 kg.

Afin d'ensemencer les bassins lors du démarrage d'une nouvelle souche, la culture se fait au préalable dans un photobioréacteur (**Fig. 15**). Le contenu sera ensuite transvasé dans le bassin contenant un milieu de culture.

La Normandie ne bénéficiant pas des conditions climatiques favorables à la culture de la spiruline mais plutôt d'un climat froid, la construction sous serre est nécessaire. Constituée de plastique translucide, (film de polyéthylène anti UV), étanche, elle permet de revaloriser la chaleur issue d'énergies renouvelables par le processus de méthanisation.



Figure 15 : Photobioréacteur contenant une souche de spiruline originaire du Burkina Faso. (Ahounou, 2018)

La serre permet de pallier aux variations de température, à l'évaporation de l'eau et aux intempéries, un orage ou une pluie pouvant diluer le milieu de culture ou faire déborder les bassins, à l'évaporation de l'eau. Enfin elle sert de protection contre tous déchets qui pourraient venir polluer le milieu de culture (insectes, feuilles).



Figure 16 : Bassin de spiruline avec un système d'ombrage (Ahounou, 2018)

Elle possède un système d'ombrage nécessaire au processus de photosynthèse. Le système d'ombrage constitue aussi une protection à une exposition prolongée à la lumière (**Fig. 16**).

4.2. Milieu de culture

Il s'agit d'une solution de sels minéraux et d'eau. Ce liquide doit apporter à la spiruline tous les éléments chimiques nutritifs qui lui sont nécessaires. Il s'agit de milieux très minéralisés riches en carbonate de sodium (Na_2CO_3) ou bicarbonate de sodium (NaHCO_3), d'une source d'azote fixé et d'autres minéraux (**Zarrouk, 1996**).

Ce milieu est peu propice à la croissance d'autres végétaux, et d'autres formes de vie au vu de son pH fortement alcalin. Aujourd'hui, de nombreux pays ont mis en place des fermes à spiruline grâce à la synthèse du milieu de culture. Le plus connu et utilisé (milieu standard) est le milieu de Zarrouk (**Zarrouk, 1996**).

Par ailleurs, même si la biomasse donnée n'est pas aussi élevée que celle du milieu de Zarrouk, des essais de milieux de culture sont effectués. Ces milieux sont composés de sels minéraux alternatifs, de nutriments essentiels avec des modifications de certaines concentrations (**Raouf et al., 2006 ; Jourdan et al., 2016**).

Certains auteurs montrent la possibilité d'utiliser les eaux usées ou de l'urine humaine traitées (élimination des éléments nuisibles pour l'homme) et auxquelles on ajoute certains sels minéraux (**Bellahcen et al., 2013 ; Yang et al., 2008**).

a) L'eau : 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 (mais ne sentant pas fortement le chlore) ou au moins filtrée (sur bougie filtrante ou sable), le plus important étant l'élimination des algues étrangères. L'eau de pluie, de source ou de forage est en général de qualité convenable. Si l'eau est dure, il se produira des boues minérales (plus ou moins abondantes selon la teneur en calcium, magnésium et fer), qui décantent rapidement et ne sont pas particulièrement gênantes pour la culture, à condition toutefois que l'ensemencement initial en spirulines soit assez concentré. (**Jordan, 1999**). Les éléments au milieu pour la culture de la spiruline sont indiqués dans tableau 11.

Tableau 11 : Composition d'un milieu de culture typique (Fox,1999)

Eléments	Concentration en mg /l
Bicarbonate	2800
Phosphate	614
Sulfate	25
Chlore	350
Sodium	3030
Potassium	4380
Magnésium	642
Calcium	10
Ammonium	5
Ammoniac	5
Fer	1

**Figure 17** : Bassin contenant de la spiruline en milieu de culture (Ahounou, 2018)

b) **Les éléments nutritif** : L'eau utilisé peut apporter de façon naturelle les besoins de la Spiruline pour se développer et limite ainsi la quantité d'intrants nécessaire à sa croissance. Le milieu de culture de la Spiruline doit être apporté tous les éléments suivants : (Jordan, 1999).

- **Bicarbonate de sodium (NaHCO_3)**: est la source d'alcalinité, qui peut aussi apporter par le natron ou l'eau de cendre;
- **Le phosphore (P)**: est indispensable pour la photosynthèse, apporté par n'importe quel Orthophosphate soluble;
- **L'azote (N)** : est un constituant important des acides aminés, qui apporté

principalement par l'azote atmosphérique, et aussi l'urée;

- **Le carbone(C)** : c'est la nourriture principale de la spiruline, qui apporté principalement par le gaz carbonique, et aussi le sucre;
- **Les métaux** : essentiellement le fer, le bore et le magnésium;

4.3. Condition de la culture

Il existe quatre facteurs essentiels déterminants pour la culture de la spiruline (la température, la lumière et le pH , Salinité).

a) Température : La température du milieu influence directement la vitesse de croissance de la spiruline, bien qu'assez résistante au froid (jusqu'à 3°C à 5°C), la spiruline ne commence à croître d'une manière appréciable qu'à des températures supérieures à 20°C. La vitesse de croissance est maximale vers 35°C à 37°C. Au-delà de 44°C peut être létale au bout de quelques heures (**Jourdan, 2006**).

b) pH : La culture de la Spiruline le pH sera entre 8.5 et 10.5 (Jordan, 1999), naturellement, la Spiruline a tendance à alcaliniser le milieu. En effet le CO₂ dissous dans l'eau, une fois mobilisé par la Spiruline, libèrent des ions carbonates (CO₃²⁻) qui en s'hydrolysant vont libérer des ions OH⁻ (**Danesi et al., 2004**).

c) Lumière : La lumière influent directement sur la croissance de la spiruline qui assuré par la photosynthèse ainsi que une forte intensité lumineuse peut conduire à la photolyse et pour l'éviter, il est convenable de vérifier deux conditions nécessaires (**Fox, 1999**) :

- Ensemencer le bassin avec une forte concentration afin que la lumière n'attient pas à la fond de bassin, et la mesure de la concentration et apporté par de disque Secchi;
- Une agitation suffisante;

d) Salinité :La spiruline peut être considérée comme une espèce à la fois halophile et très euryhaline, en milieu naturel les salinités tolérées vont de 8 PSU à 270 PSU (Beadle, 1943). Les limites de la salinité et d'alcalinité permises sont assez larges, 13 g/litre pour la salinité et une alcalinité de 0,1 molécule-gramme/litre (b = 0,1) (**Jourdan, 2006**).

4.4. Techniques de culture

a) Ensemencement : Dans un site dépourvu de la spiruline, ou pour redémarrer avec une nouvelle souche, il doit démarrer avec un gramme de spiruline concentré dans un volume

de culture, si on veut travailler avec un volume important il s'agit de multiplier de volume de semence initiale, il est convenable de faire des cultures successives, si la concentration de culture est plus faible, il faut ombrer avec une agitation continue sinon la spiruline va s'agglomère (**Jordan, 1999**).

b) Mesure de la concentration d'une culture de Spiruline : La concentration d'une culture peut être évaluée par l'intensité de sa couleur. On utilise pour cela un " disque de Secchi ": il s'agit d'une règle graduée à l'extrémité de laquelle se trouve fixé (perpendiculairement) un petit disque blanc. On plonge cet instrument dans la culture, jusqu'au point où le disque cesse d'être visible. La profondeur du disque est alors lue sur la règle graduée. Une culture est diluée si le disque de Secchi reste visible au-delà de 5-6 cm de profondeur; une valeur de 2-3 cm correspond à une culture prête à la production. Des valeurs inférieures à 2 cm indiquent qu'il est nécessaire de diluer la culture, ou de récolter fortement (**Flaquet, 1996**).

c) Agitation : Elle est nécessaire pour assurer une bonne culture, au moins (2-4) fois par jour, qui augmente avec l'intensité de la lumière, cela permet d'assurer :

- L'homogénéisation de la culture
- Répartition de l'éclairage
- Évité la formation des boues minérales et aussi l'agglomération des filaments de la Spiruline.

Le mode d'agitation peut être : manuelle avec un balai ou électrique avec une pompe ou une roue à aubes, l'agitation peut être continue si on utilise une pompe avec sans danger sur la spiruline. L'agitation nocturne continue favorise nettement l'autoépuration de milieu (**Jordan, 1999**).

d) Ombrage : L'ombrage est nécessaire quand la température de la culture est très basse, inférieure de 10 C° avec une forte intensité lumineuse pour éviter la destruction de la Spiruline par la photolyse, ainsi une culture sous ombrage est plus facile à récolter et la qualité de la Spiruline est améliorée (**Jordan, 1999**).

e) Récolt : Les récoltes s'effectuent au gré des saisons, la luminosité et l'ensoleillement jouant un rôle prépondérant dans le processus de production de spiruline, les récoltes se terminent à la fin novembre. Il s'ensuit la mise en place de l'ombrage en attente de meilleurs conditions de croissance c'est-à-dire au prochain printemps.

La spiruline est prête pour la récolte lorsque sa concentration dans le bassin de culture est autour d'un Secchi de 2-3 cm.

Elle est organisée de manière à maintenir un flux continu entre les matières premières et le produit fini. Ainsi, une récolte régulière permettra à la culture de garder une croissance exponentielle (Jourdan, 2014).

La récolte s'effectue à l'aide d'une pompe (Fig. 18), qui déverse un volume du milieu de culture à travers un premier système de filtration à tambours.



Figure 18 : Système d'aspiration de la spiruline au travers d'une pompe (Ahounou,2018)

Il s'ensuit une deuxième filtration à travers une toile. La spiruline est ensuite recueillie manuellement (Fig. 19) permettant l'obtention d'une pâte fluide appelée biomasse.



Figure 19 : Récolte manuelle de la biomasse de spiruline (Ahounou, 2018)

Cette biomasse de spiruline ne doit pas être laissée à l'air libre afin d'éviter sa fermentation. Elle subit ensuite le processus de pressage.

f) **L'essorage et le pressage** L'essorage et le pressage consistent à éliminer une partie de l'eau de la récolte. L'essorage est effectué à la main au moyen d'un tissu (**Fig. 21**), en effet, la biomasse prélevée est enveloppée dans une toile de 30 μ pour être essorée.

Le pressage de la pâte essorée est assuré par une presse à vis (**Fig. 20**) pendant 15 minutes environs et on obtient la biomasse fraîche. Ce dernier est pesé à l'aide d'une balance de précision (**Jourdan, 2014**).



Figure 20 : Pressage par une presse à vis (**Goulamabasse, 2018**)



Figure 21 : Pâte de spiruline après pressage (**Ahounou, 2018**)

g) **L'extrusion** : Après pesage, la biomasse obtenue est alors chargée dans une extrudeuse (**Fig. 22**). Cet instrument permet de transformer la pâte sous forme de spaghettis (**Fig. 23**). La biomasse est extrudée sur des claies de séchage rectangulaires (1m x 0,5 m) où

elle est disposée en cordons afin de faciliter le séchage. En principe les spaghettis doivent être étalés de façon à ce qu'ils ne se superposent pas et permettent ainsi le passage de l'air chaud à travers la claie dans les séchoirs. L'extrusion doit être réalisée lentement pour éviter l'éclatement des filaments de spiruline.



Figure 22: Extrudeuse de capacité d'environ 5 kg de biomasse (Goulamabasse, 2018)



Figure 23 : Biomasse transformée sous forme de spaghettis par l'extrudeuse (Goulamabasse, 2018)

h) Séchage : On peut sécher à l'ombre simplement dans un courant d'air à température ambiante, sous moustiquaire (il suffit que l'air soit à température nettement supérieure à son point de rosée). On peut sécher facilement la spiruline dans une armoire métallique munie d'un déshumidificateur et d'un ventilateur recyclant l'air à travers les

plateaux de séchage (**Fig. 24**), Le déshumidificateur doit être capable d'abaisser l'humidité relative de l'air à 30 %. Le séchage au plein soleil en plein air est le plus rapide et le moins coûteux, mais il a des inconvénients : le produit est exposé aux poussières et aux animaux, et il risque de bleuir en surface par destruction de la chlorophylle par les ultra-violets (**Jourdan, 2006**). Le temps de séchage varie selon :

- l'épaisseur de la biomasse fraîche sur chaque plateau,
- le nombre de plateaux superposés,
- le % de sec dans la biomasse,
- la souche (les spiralées sèchent un peu plus vite),
- la température et l'humidité de l'air,
- le débit d'air.



Figure 24 : Séchage de la spiruline dans un séchoir solaire (**Goulamabasse, 2018**)

4.5. Formes de la spiruline

La spiruline peut se présenter sous différentes formes galéniques : paillettes, poudre, comprimés et gelules. Les comprimés et les gelules sont les deux formes les plus retrouvées en officine.

À l'heure actuelle, en plus de l'officine, la spiruline peut être achetée dans : des supermarchés, des magasins bio, sur des sites de vente en ligne, des marchés ou encore chez des spiruliniers.

4.5.1. La spiruline fraîche

La spiruline fraîche est logiquement la forme la moins transformée de ce super aliment. Encore vivante, son activité enzymatique est donc totalement intacte. La difficulté est qu'elle ne se conserve pas plus de 48 heures sous cette forme et il est nécessaire de préserver la chaîne du froid. Elle doit donc être mise au réfrigérateur dès la récolte et conservée au frais

jusqu'à ce que vous la consommiez. Ces contraintes font que la seule manière de vous en procurer est directement chez un spirulinier s'il en existe un près de chez vous. Et seulement pendant la période de récolte qui est possible en France (d'avril à octobre). Notons que notre climat ne convient pas à la spiruline et qu'il est nécessaire de la cultiver sous serre. Une alternative serait de la produire soi-même à votre domicile. Nous réfléchissons chez Dihé à vous proposer cette solution. Elle n'aura pas la même qualité que celle provenant de son environnement tropical naturel mais vous bénéficierez d'une spiruline toujours fraîche et vous développeriez votre résilience. [17]

4.5.2. En liquide ou spiruline bleue

Désormais, de nombreux magasins la commercialisent sous forme liquide. Celle-ci est souvent présentée dans un petit flacon, tel un sirop ou dans des ampoules cassables. Il s'agit en fait d'extraits plus ou moins concentrés du pigment bleu de la spiruline : la phycocyanine. Il est donc impropre de parler de spiruline dans ce cas. La phycocyanine est le principe actif de la spiruline le plus étudié par la communauté scientifique. Elle ne bénéficie cependant d'aucune allégation santé autorisée par les autorités sanitaires françaises (ANSES) ou européennes (EFSA). Nous vous laissons donc le soin de faire vos propres recherches.

Cette forme pourrait s'avérer intéressante dans des cas très précis. Il faut cependant que la concentration en phycocyanine soit à la hauteur. Nous avons remarqué qu'il y a de nombreuses marques qui proposent de la spiruline bleue à prix d'or mais dont les teneurs en phycocyanine sont plus faibles que celles que vous trouvez dans une spiruline de qualité. Et cela, sans que la spiruline sous forme liquide vous offre tous les nutriments que la micro-algue contient avant extraction (protéines, oligo-éléments, vitamines ...).[17]



Figure 25 : Spiruline liquide [13]

4.5.3. En paillettes

Les paillettes sont considérées comme la forme la plus traditionnelle de ce produit. On parle de spiruline artisanale ou spiruline paysanne. C'est la forme brute de cette algue qui rappelle celle de petites brindilles. Elle n'a subi qu'une transformation légère, étant en général récoltée de manière douce et séchée à basse température. Cette forme respecte tout à fait l'intégrité de cette algue et la qualité nutritionnelle est donc préservée. Elle peut avoir un goût plus ou moins prononcé, en fonction des méthodes culturales, de la qualité de l'eau, des techniques et du temps de séchage. En outre, la forme de paillettes est celle qui est la plus utilisée dans les recettes.

Astuce : son existence sous forme de paillettes est un moyen simple de savoir si la marque, qui peut également proposer d'autres formes comme la poudre et les comprimés / gélules, commercialise une spiruline paysanne. Les industriels, en raison de leur mode de séchage, peuvent en fournir. [17]



Figure 26 : Spiruline en paillettes [17]

4.5.4. En comprimés et en gélules

Les comprimés ou les gélules sont les formes les plus populaires et les plus répandues. Cela est dû en partie au fait qu'elles sont les plus pratiques à avaler. L'autre raison, sans doute la principale, est que les spirulines qui se trouvent sur le marché ont en général très mauvais goût. Avalées sous forme de comprimés ou de gélules, le consommateur ne s'en rend pas compte.

Autre problème avec les comprimés et les gélules, des additifs sont quasi systématiquement ajoutés à ces formes : agglomérants, anti-agglomérants ... Il peut s'agir d'excipients allergènes, suspectés de diminuer l'assimilation des nutriments (stéarate de magnésium), contenant des nano-particules (dioxyde de titane ou de silicium). Prendre de la spiruline pour sa santé et son bien-être et absorber ces excipients nous semble ainsi tout à fait contradictoire. Veillez ainsi à ce que votre fournisseur vous garantisse comme Dihé que vos

comprimés soient bien exempts d'additifs. Une manière pour vous assurer que votre comprimé ne contient que de la spiruline est d'en croquer un. S'il se réduit immédiatement en poudre, c'est que le comprimé est bien pur et ne contient aucun agglomérant donc additif.

Enfin, les comprimés et les gélules sont dans la majorité des cas produits par des industriels (très souvent bio). Ceux-ci utilisent des pompes à haute pression qui éclatent les fragiles parois de la micro-algue ainsi que des méthodes de séchage à haute température. Les qualités nutritionnelles sont ainsi fortement dégradées par ces deux pratiques.

Si vous optez pour la spiruline en comprimés ou en gélules, choisissez-en une qui a été séchée à basse température et qui a été compressée à froid, sans excipients. [17]



Figure 27 : Spiruline en comprimés [17]



Figure 28: Spiruline en gélules [17]

4.5.5. La spiruline en poudre

Cette forme provient de deux sources possibles. Il peut s'agir d'une spiruline paysanne, séchée à basse température, dont les paillettes ont été réduites en poudre. Il s'agit cependant le plus souvent d'une production industrielle dont les processus de culture, de récolte et de séchage ne respectent pas l'intégrité du produit. Vérifiez donc bien avant de l'acheter.

Elle est principalement utilisée pour les smoothies, les jus verts et autres jus de légumes naturels. Elle peut être également ajoutée aux soupes, sauces, condiments ...etc

Nous préférons cependant la spiruline en paillettes Dihé. Très croquantes, elles se saupoudrent facilement sur les salades, les plats de pâtes ou de riz, les légumes grillés ou vapeur, etc. Les paillettes peuvent également être ajoutées à des liquides (les paillettes fondent vite) et même être consommées comme des comprimés (avalées avec une boisson, sans croquer).

Si la spiruline est un aliment extraordinaire, certaines l'utilisent aussi réduite en poudre pour préparer des masques nourrissants pour le visage ou les cheveux. [17]

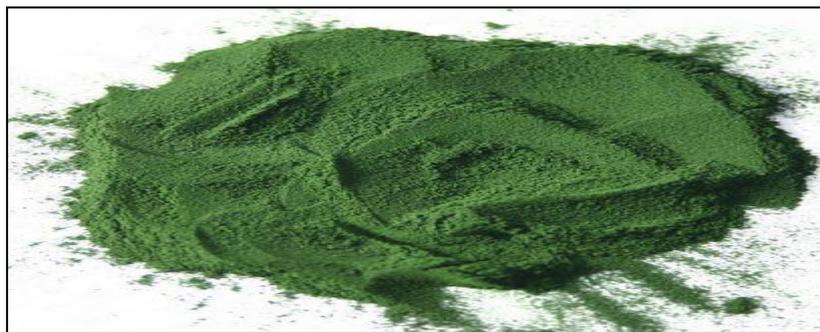


Figure 29 : Spiruline en poudre [17]

4.5.6. En pétales

Plus rare, cette forme peut également être trouvée chez des spécialistes de la micro-algue. La spiruline en pétales est exclusivement à utiliser pour agrémenter des plats. Ceux-ci peuvent être chauds ou froids, l'important étant comme pour les autres formes de ne pas la cuire. [17].

5. Intérêts biotechnologiques de la spiruline

L'impressionnante teneur en protéines des spirulines, ainsi que leur vitesse de croissance, dans de milieux totalement minéraux, qui ont attiré l'attention des chercheurs, comme des industriels. Elle est entrée à l'échelle industrielle dans le domaine pharmaceutique, cosmétique et l'industrie alimentaire etc.

5.1. Dans l'industrie cosmétique

Certains laboratoires de soins cosmétiques ont introduit la spiruline dans des crèmes, des shampoings ou des sérums qu'ils commercialisent du fait du nombre non négligeable d'actifs naturels retrouvés dans cette cyanobactérie (acides aminés, oligoéléments, anti oxydants, minéraux, vitamines, acides nucléiques (composants de l'ADN), protéines, acides gras essentiels...) (**Banks, 2007**). Grâce à ses propriétés anti-oxydantes qui empêchent la formation de radicaux libres, la spiruline améliore la souplesse et l'élasticité de la peau et donc retarde son vieillissement et apporte brillance et résistance aux ongles et aux cheveux par les nutriments et les oligoéléments qu'elle concentre (**Banks, 2007**). Considéré comme un aliment « beauté » d'exception, la spiruline est utilisée aujourd'hui dans les soins anti-âges à connotation marine, dans la préparation de produits de soins en spa et thalasso (masques visage, enveloppements corporels), comme soins réparateurs et fortifiants des cheveux et des ongles, en cataplasme et enveloppement marins, comme soin revitalisant pour le corps ou masque minéralisant du visage (**Casal, 2019**).

5.2. Dans l'industrie pharmaceutique

L'industrie pharmaceutique, toujours en quête de nouvelles molécules, a été l'une des pionnières à observer la nature, à l'utiliser et à la copier. Plus de 60% des anticancéreux et 70% des antibiotiques utilisés aujourd'hui dérivent de produits naturels. Aujourd'hui la recherche de nouvelles molécules apportant un réel bénéfice thérapeutique est de plus en plus difficile et coûteuse. Les grands laboratoires pharmaceutiques ont besoin de trouver des molécules innovantes qu'ils pourront protéger par des brevets pendant plusieurs années et sur lesquelles ils pourront avoir un retour sur investissement rapide et de longue durée. C'est pourquoi, la tendance est aux médicaments biotechnologiques ou nanotechnologiques dérivés de la biologie moléculaire permettant le développement de molécules à action ciblée pour une réelle avancée thérapeutique. La spiruline en tant que telle n'intéressera pas les industries pharmaceutiques car, malgré ses propriétés démontrées comme anti-inflammatoire, elle n'apporte pas de réelle avancée thérapeutique et ses effets sont surtout préventifs et non curatifs. Néanmoins, l'étude du mode d'action et de la conformation des molécules actives de l'algue pourrait permettre le développement de nouvelles molécules synthétiques qui pourraient être exploitées dans des médicaments apportant un réel bénéfice thérapeutique. La nature reste encore un grand champ de recherche à explorer et les industriels du médicament ne manqueront pas de s'en inspirer (**Sguera, 2008**).

5.3. Dans l'Environnement

L'utilisation des micro-algues (spiruline) dans le secteur de l'environnement s'intègre dans une optique de dépollution avec pour idée de transformer nos déchets en produits, comme par exemple le traitement des eaux usées chargées en nitrates, phosphates, l'épuration d'effluents gazeux contenant du CO₂ mais aussi divers oxydes NO_x, SO_x, et la bioremédiation possible des sites pollués (**Person, 2011**).

a) **La Production de bioplastique** : Les déchets plastiques sont l'un des problèmes environnementaux les plus importants de la planète, Le besoin d'une solution innovante pour lutter contre cette pollution mondiale est inévitable d'autant plus que l'augmentation du recyclage des déchets plastiques n'est pas à elle seule une solution globale. Onen et Coll., (**Onen Cinar et al., 2020**) ont montrés - sur la base de leurs études -que les espèces *Chlorella* et *Arthrospira* étaient les plus couramment utilisées dans la production de biopolymères et de mélanges de plastiques. Des additifs tels que des plastifiants et divers produits chimiques ont été utilisés comme matériaux de mélange pour augmenter la qualité du produit final ce qui appelle à plus de recherche pour le rendre plus sain afin de l'utiliser dans les domaines liés à l'alimentation et à la santé, tels que les emballages alimentaires et les soins de santé. Gozan et Noviasari (**2018**) ont expliqués la méthode de fabrication de films bioplastique à partir de spiruline. Il démontre aussi que l'ajout de glycérol comme plastifiant a entraîné une amélioration d'allongement du bioplastique fabriqués. Bien que le film bioplastique de *Spirulina platensis* ait une résistance à la traction plus élevée que le plastique commercial. Il est conclu que ce film bioplastique a montré des propriétés attirantes pour être utilisé dans vaste domine d'application et que la spiruline est l'un des matériaux prometteurs en raison de sa teneur élevée en protéines.

5.4. Dans l'industrie alimentaire

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 (**Boudaoud, 2016**).

La spiruline peut être consommée seule ou mélangée à un aliment. Elle rentre dans la fabrication de plusieurs produits alimentaires, pour ses propriétés nutritionnelles mais

également pour ses avantages technologiques, Il existe actuellement plusieurs aliments enrichis en spiruline, comme : le pain, le couscous, les gâteaux, les crèmes, les yaourts, la farine, les produits algaux mélangés à du sel, les tagliatelles, le miel, le sucre, la soupe et les boissons...etc.

5.4.1. Aliments fonctionnels à base de spiruline

Les tableaux 12, 13, 14 et 15 présentent quelques travaux de recherches sur la supplémentation de la spiruline céréaliers avec des produits alimentaires (Produits céréaliers, laitier, produits gras t des boissons).

a. Produits céréaliers :

Tableau 12 : Produits céréaliers (couscous artisanal, biscuits et pates alimentaires) supplémentés avec la spiruline (**Toudert et Bouzidi, 2020**)

Types d'aliment	Objectifs	Résultats et effets démontrés	Références
Couscous artisanal	Etudier l'impact de l'incorporation de la spiruline dans la semoule de blé dur afin de préparer une variété de couscous enrichi (1-2% de spiruline).	La supplémentation en spiruline a influencé la qualité organoleptique de manière positive. Cependant, sa viscosité élevée a contribué à la formation de grumeaux. L'obtention d'un nouveau produit très riche en nutriments Le déficit du blé dur en certains acides aminés essentiels et particulièrement en lysine, a été comblé par l'ajout de spiruline. Ce qui est un bon moyen de lutter contre le déficit en ces acides aminés essentiels pour le corps.	(Boudaoud, 2016)

Biscuit	Étudier l'effet de l'incorporation d'extraits de biomasse et de phycocyanine de <i>Spirulina platensis</i> à des biscuits au beurre traditionnels, afin de l'enrichir en nutriments et substances bioactives	<p>Les résultats ont révélé que <i>S. platensis</i> avaient des protéines de haute qualité, une huile riche en acides gras insaturés, glucides, phycocyanine, caroténoïdes (sous forme de pigments photosynthétiques) et composés antioxydants (comprennent: phénoliques totaux, flavonoïdes, tocophérols, acide ascorbique et glutathion). La spiruline utilisée a montré des quantités importantes en protéines, graisses et glucides avec des valeurs de 40,57%, 20,40% et 16,32%, respectivement. Les pigments photosynthétiques, la phycocyanine (13,51%) et les caroténoïdes (2,51%) ont également été trouvés en quantités importantes.</p> <p>La concentration en composés antioxydants comprenant: phénoliques, flavonoïdes, les tocophérols, l'acide ascorbique et le glutathion dans la biomasse étaient de 1,73%, 0,87%, 0,43%, 1,25% et 0,245 mm, respectivement.</p>	(Abd El Baky <i>et al.</i> , 2015)
Pâtes alimentaires	Incorporation de la biomasse de <i>Chlorella vulgaris</i> et de <i>Spirulina maxima</i> dans les pâtes. Plus précisément, le but de la présente étude était de préparer des spaghettis frais enrichis en différentes quantités de biomasse et de comparer les paramètres de qualité (temps de cuisson optimal, pertes de cuisson, indice de gonflement et absorption d'eau), composition chimique, instrumentale texture et couleur des pâtes crues et cuites enrichies de biomasse de micro algues avec des spaghettis de semoule standard.	<p>L'incorporation de la micro algue et de la cyanobactérie entraîne une augmentation des paramètres de qualité par rapport à l'échantillon témoin. La couleur des pâtes est restée relativement stable après la cuisson.</p> <p>L'ajout a également augmenté la fermeté des pâtes crues par rapport à l'échantillon témoin. De toutes les micro-algues étudiées, une augmentation de la concentration en biomasse (0,5-2,0%) se traduisant par une tendance générale à une augmentation de la fermeté des pâtes.</p> <p>L'analyse sensorielle a révélé que les pâtes aux micro-algues avaient des scores d'acceptation plus élevés par le panel de dégustation que les pâtes témoins.</p> <p>L'utilisation de la biomasse de micro algues peut améliorer la qualité nutritionnelle et sensorielle des pâtes, sans affecter ses propriétés de cuisson et de texture</p>	(Ana Paula Batista <i>et al.</i> , 2010)

b. Produits laitiers :**Tableau 13 : Produits laitiers supplémentés avec la spiruline (Toudert et Bouzidi, 2020)**

Type d'aliment	Objectifs	Résultats et effets démontrés	Référence
Fromage frais	L'élaboration d'un fromage frais enrichi en spiruline et mesurer l'effet de la spiruline sur la flore lactique.	La spiruline a diminué la capacité de rétention d'eau du caillé lors de l'emprésurage. L'augmentation du rendement fromager ainsi la qualité nutritionnelle du produit fini si l'ensemencement en spiruline se fait directement dans le caillé. Ils émettent la possibilité d'administration d'un fromage frais enrichi en spiruline aux enfants algériens en bas âge ayant un problème de vision crépusculaire.	(Safia,2010)
Lait fermenté	Supplémentation de laits fermentés en <i>Spirulina platensis</i> et <i>Chlorella vulgaris</i> afin d'améliorer la viabilité des probiotiques.	L'apport en <i>S. platensis</i> et <i>C. vulgaris</i> affecté la viabilité des probiotiques dans le produit final, mais également leurs attributs sensoriels. L'incorporation dans les laits fermentés a montré une amélioration de la viabilité des probiotiques augmenterait leur caractéristique fonctionnelle, parce qu'ils contiennent une large gamme de nutriments et sont considérés comme des «substances fonctionnelles»	(Beheshtipour et al., 2013)

c. Produits gras :**Tableau 14 : Produits gras à base de spiruline (Toudert et Bouzidi, 2020)**

Type d'aliment	Objectifs	Résultats et effets démontrés	Référence
Mayonnaise	Etudier l'effet de l'ajout de la spiruline (1-2% du poids total) sur les caractéristiques organoleptiques et physicochimiques de la Mayonnaise. Evaluer in vitro l'activité antioxydante de la spiruline ; Dosage des polyphénols contenus dans cette matière ; Détermination de l'activité antibactérienne de la	La spiruline a montré que c'était une bonne source d'antioxydants qui pourraient représenter une alternative à certains additifs synthétiques. Les résultats ont montré aussi une teneur appréciable de la spiruline en polyphénols et une activité antibactérienne affirmée contre certaines souches pathogènes.	(Lahoucine, 2019)

	spiruline vis-à-vis quelques souches pathogènes.		
Margarine	Tester une éventuelle substitution de l'additif synthétique « α tocophérol » utilisé comme conservateur dans la fabrication de la margarine à tartiner « Fleurial© 500 g » par un additif naturel « extrait de Spiruline ». Evaluer in vitro l'activité antioxydante de l'extrait de <i>S.platensis</i> (composés phénoliques et caroténoïdes).	Dans cette étude, l'extrait de la spiruline a été classé comme un additif naturel de substitution très intéressant par sa richesse en substances bioactives, et un agent antioxydant naturel qui donne de meilleurs résultats à une plus faible concentration (50 ppm) que l'agent antioxydant de synthèse « α -tocophérol » à 100 ppm rajouté à la margarine témoin. Il peut substituer le pigment par sa richesse en β -carotène, en sel, en acide lactique et en sorbate de potassium.	(Yahiaoui, 2017).

d. Boissons :

Tableau 15 : Boisson enrichie en spiruline (Toudert et Bouzidi, 2020)

Type d'aliment	Objectifs	Résultats set effets démontrés	Référence
Jus	La formulation et le suivi de la qualité physicochimique, microbiologique et organoleptique d'un pur jus 100% orange « Vitajus© » enrichi en différentes doses de spiruline (0.5, 1 et 1.5 g/l). la détermination de la dose létale médiane « DL50 » de spiruline et l'épreuve de toxicité.	L'ajout de spiruline n'a pas d'effets sur les paramètres physicochimiques. Le produit a montré également une bonne qualité microbiologique La qualité organoleptique de la formule 0,5g/l a été jugé la plus acceptable par le panel de dégustation. Le jus enrichi est resté stable au cours des 4 semaines suivant sa production à une température ambiante de 22°C. Le test de toxicité aigüe de la spiruline effectué sur les souris confirme que la spiruline n'est pas toxique selon l'échelle de Hodge et Sterner.	(Mahidjoub et al., 2016)

5.5. Comme complément alimentaire

Depuis près de 10 ans, la spiruline a déjà été référencée dans de nombreux produits et formes galéniques différents (comprimés, gélules, poudre...), parfois appelés à défaut « cosmétique par voie orale », ces produits vantent les mérites de l'algue aux milles vertus sans pour autant avoir fait l'objet d'études scientifiques. Comme pour les cosmétiques, les industriels se fondent sur les nombreuses études dont la spiruline a fait l'objet. La spiruline et

ses constituants ont réellement été testés *in vivo*, la transposition d'activité est donc possible, seule reste à démontrer que la dose active pour l'effet escompté a été atteinte.

Aujourd'hui, la quasi-totalité des compléments alimentaires à base de spiruline sur le marché ont comme indication de traiter la fatigue ou d'apporter une supplémentation protéique. Ces indications utilisent seulement les propriétés nutritionnelles de l'algue à savoir sa composition riche en protéines et en vitamines. Aucun ne fait part des propriétés thérapeutiques.

En effet, il est légalement interdit pour un complément alimentaire de vanter des propriétés curatives ou thérapeutiques auquel cas, il serait considéré comme un médicament.

Dans le décret 2006-352, publié au Journal Officiel de la République Française le 20 mars 2006 : “on entend par complément alimentaire, les denrées alimentaires dont le but est de compléter le régime alimentaire normal et qui constituent une source concentrée de nutriments ou d'autres substances ayant un effet nutritionnel ou physiologique seuls ou combinés, commercialisés sous forme de doses destinées à être prises en unités mesurées de faible quantité”. Cette définition confirme que les compléments alimentaires sont bien des denrées alimentaires et apporte des éléments supplémentaires, notamment le fait que des substances ayant un effet nutritionnel ou physiologique, tels certains phytoconstituants, ou des plantes... peuvent entrer dans leur composition , La spiruline ou ses constituants extraits répondent donc parfaitement à cette définition, d'autant plus que sa composition est conforme à la liste des substances autorisées pour les compléments alimentaires (Sguera, 2008).

6. La spiruline en Algérie

L'Algérie fait partie des rares pays dans le monde cultivant de la spiruline, on assiste à une production artisanale et expérimentale. L'unique Algérien qui connaît parfaitement le processus de production de cette espèce d'algue s'appelle Hiri Abdelkader il a réussi à faire déplacer la culture de cette microalgue de son environnement naturel (El Guelta) vers un bassin.

Il dispose d'un bassin d'une superficie légèrement au-dessus de 20 m² et produit 20 kg de spiruline sèche par an. C'est dans la région de Tamanrasset que cela se passe, après quatre mois d'ensemencement du bassin, on peut déjà récolter la spiruline.

Les régions à climat désertique (Sahara algérien) sont riches en natron et sont donc bien placées pour cultiver à grande échelle *Arthrospira*. A Tamanrasset (sud algérien), des mini-fermes comprenant trois bassins agités ont été installées en vue de la culture de *Spirulina* (*Arthrospira*) et depuis, de petites unités de productions sont envisagées pour développer la culture de cette cyanobactérie à Tamanrasset même et de là, l'étendre à toute l'Algérie (**Salès, 2004**).

D'autres essais de culture de *Arthrospira*, ont été réalisés dans d'autres régions d'Algérie et particulièrement au lac d'El Goléa. Les premiers résultats sont encourageants et montrent que la souche utilisée s'est bien adaptée et qu'elle a formée une pellicule verdâtre à la surface de l'eau et ce après un mois de culture (**Brahimi et al., 2000**).

La culture de la spiruline en Algérie est en mesure d'encourager la création des petites entreprises dans le cadre des dispositifs de prise en charge des citoyens sans emplois, au Sahara algérien. L'avantage pour notre pays, c'est que les coûts de l'investissement et de la production sont insignifiants en raison de l'environnement naturel et des conditions climatiques du sud du pays, de la disponibilité des matériaux à l'échelle nationale et le coût pas du tout élevé de la main-d'œuvre, notamment pour les Algériens qui résident dans le sud du pays.

Conclusion

Conclusion

Présentée comme une « algue miracle aux mille vertus », La spiruline est souvent mise en avant dans les officines et magasins bio. Cette cyanobactérie n'a suscité l'intérêt des scientifiques que tardivement, elle jouit aujourd'hui d'un intérêt grandissant grâce à ses multiples propriétés thérapeutiques et nutritionnelles. Ce regain d'intérêt se traduit par les nombreuses études publiées que nous avons consultées pour réaliser notre travail et qui portent sur tout ce qui caractérise la Spiruline.

En premier lieu nous avons décrit tous les aspects biologiques de la spiruline (morphologique, taxonomique, cycle biologique.). Cette description nous a permis de constater la grande plasticité morphologique et son adaptation exceptionnelle dans des milieux très variés et surtout hostiles (température, alcalinité et salinité élevées). Ensuite, les analyses nutritionnelles démontrent que la spiruline contient des teneurs très importantes en nutriments et oligoéléments bénéfiques pour l'homme et pour les animaux.

Un aperçu sur les différentes méthodes de productions et l'évolution de la production mondiale et régionale de la spiruline, révèle que la production est divisée en deux modes : le premier est artisanal et dépend de plusieurs facteurs (climatiques et environnementaux). Le second est une production industrielle qui utilise les techniques de l'industrie agroalimentaire pour améliorer la productivité, ce qui fait que la production mondiale de la spiruline est en constante augmentation, mais reste très faible en Algérie.

En effet, la production et l'utilisation de la spiruline présentent de nombreux avantages :

- ✓ elle fournit un produit protéique facilement digestible à forte teneur en β -carotène, vitamine B12, fer et acide γ -linoléique (acide gras essentiel rare) ;
- ✓ sa production présente une faible empreinte écologique et environnementale, avec un rendement photosynthétique élevé et un taux d'occupation des sols très faible par rapport aux cultures terrestres ;
- ✓ sa production est particulièrement propice à des conditions chaudes, salines et alcalines adaptées aux réalités agricoles des pays chauds, voire désertiques, où la spiruline peut constituer un moyen durable pour lutter contre la malnutrition.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Ali H. Al-T. (2006) Heavy Metal levels in Saudi Arabian *Spirulina*. *Pakistan Journal Of Biological*. P.1-4

Ahounou M. N. (2018). La SPIRULINE : un complément alimentaire en conseil à l'officine. Enquête d'utilisation. (Doctoral dissertation, Université de Rouen).

ANSES. (2017) AVIS de l'ANSES relatif aux "risques liés à la consommation de compléments alimentaires contenant de la spiruline." Maisons-Alfort: 2017. Disponible sur <https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2014SA0096.pdf> (dernière consultation Janvier 2018).

Baicus C. et Baicus A. (2007). *Spirulina* did not ameliorate idiopathic chronic fatigue in four N-of-1 randomized controlled trials. *Phytother Res.* 21 : 570-3.

Banakar V., Alam Q., Rajendra S.V., Pandit A., Cladius A., et Gnanaprakash K. (2020). *Spirulina*, The Boon of Nature. *International Journal of Research in Pharmaceutical Sciences*, 11(1), 57-62.

Banks J. (2007). Etude de la Spiruline au Palacret, Etudier la Faisabilité de la Mise en Place d'une Filière Spiruline sur le site du Palacret, dans les Côtes d'Armor, Manuel, p 10, 11.

Beadle L.C. (1943). An ecological survey of some inland saline waters of Algeria. p. 44.

Bellahcen T.O., Bouchabchoub A., Massoui M. et Yachioui M.E. (2013). « Culture et production de *spirulina platensis* dans les eaux usées domestiques », *LARHYSS J. ISSN 1112-3680*, no 14, 2013.

Bernard C. (2014). Les cyanobactéries et leurs toxines. *Rev Francoph Lab* 2014;2014:53–68.

Boudaoud S. (2016) : L'incorporation de la spiruline sur les qualités nutritionnelles, organoleptiques et technologiques du couscous artisanal. Mémoire de master en Technologie des industries agro-alimentaires, Université Abou Bekr Belkaid- Tlemcen

Casal A. (2019) : l'Aliment Idéal et le plus Complet de Demain, Site web, www.spirulinefrance.fr

Charpy L., Langlade M.J. et Alliod R. (2008). La spiruline peut-elle être un atout pour la santé et le développement en Afrique. Disponible sur http://www.plancton-dumonde.org/fileadmin/documents/IRD_spiruline_atout_developpement_afrique.pdf (dernière consultation : mai 2016)

Chen T., Zheng W., Wong Y.S., Yang F., et Bai Y. (2006). Accumulation of selenium in mixotrophic culture of *Spirulina platensis* on glucose. *Bioresource Technology*, 97 (18), 2260-2265

Ciferri O. (1983). *Spirulina*, the edible microorganism. *Microbiol Rev* 1983; 47:551-78.

Cruchot H. (2008) La spiruline: bilan et perspectives. Thèse d'exercice. Université de Franche-Comté. Faculté de médecine et de pharmacie, 2008.

Danesi E.D.G., Rangel-Yagui C.O., Carvalho J.C.M. et Sato S. (2004). Effect of reducing the light intensity on the growth and production of chlorophyll by *Spirulina platensis*. - Biomass and Bioenergy: 329-335 dans les mares natronées du Kanem (Tchad). Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Hydrobiol., vol 2, 119-125.

Deng R. et Chow T.J. (2010). Hypolipidemic, Antioxidant and Antiinflammatory Activities of Microalgae. *Spirulina. Cardiovasc Ther.*28 : 33-45

Dupire J. (2011). La spiruline un super aliment. Edition : Les éditions Trédaniel. ISBN-13 : 978-2813202154. 151p.

El Khilifi M. (2020). Contribution a l'étude de la composition chimique de la spiruline : *spirulina platensis* (mémoire de Master, Université Abou Bekr Belkaid -Tlemcen).

Esener O.B.B., Gurel-Gurevin E., Isbilen-Basok B., Yigit F., Bilal T., Altiner A., Yilmazer N. et Armutak E.L. (2017). *Spirulina Platensis* Affects Factors Involved in Spermatogenesis and Increases Ghrelin Receptors in Testis Tissue of Rats Fed a High-Fat Diet. *Pol J Vet Sci.* 26 sept 2017;20(3):467-75.

Evets L. et Coll L. (1994). Means to normalize the levels of immunoglobulin E, using the food supplement *Spirulina*. *Grodenski State Medical* Falquet et J.-P. Hurni, Spiruline Aspects Nutritionnels, Antenna Technologies Novembre 2006.

Falquet J. (1996). *Spirulina : Aspects nutritionnels*, document Antenna technologie Genève.

Fox RD. (1999) *La spiruline: technique, pratique et promesse*. Aix-en-Provence: Edisud; 1999.

Gantar M. et Svirčev Z. (2008) Microalgae and cyanobacteria: food for thought (1). *J Phycol* 2008;44:260–8.

Guo J.P., Yu S. et McGeer P.L.(2010). Simple in vitro assays to identify amyloid-beta aggregation blockers for Alzheimer's disease therapy. *J Alzheimers Dis JAD*. 19: 1359-70.

Goulambasse T.R. (2018): « la spiruline : activité thérapeutique et son intérêt dans la lutte contre la malnutrition à Madagascar ». Thèse pour le diplôme d'état de docteur en pharmacie 20/06/2018.

Gozan M. et Noviasari C. (2018). The effect of glycerol addition as plasticizer in *Spirulina platensis*-based bioplastic. In E3S Web of Conferences (Vol. 67, p. 03048). EDP Sciences.

Habib M.A., Parvin M., Huntington T., Hasan M. (2008) *Review on culture, production and use of spirulina as food for humans and feeds for domestic animals and fish*. Rome: 2008. Disponible sur <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/011/i0424e00.pdf>.

Hayashi T., Hayashi K., Maeda M. et Kojima I. (1996). Calcium spirulan, an inhibitor of enveloped virus replication, from a blue-green alga *Spirulina platensis*. *Journal of natural products*, 59(1), 83-87.

Hetzel B. et Pandav C. (1997): *SOS pour un milliard* Presses de l'Université d'Oxford, Great Clarendon Street, Oxford.

Hocini A. et Zebboudj A.E. (2017). *Production de la Spiruline en Algérie (Arthrospira platensis): Bilan et perspectives*. Mémoire de Master, Université Abderrahman Mira-Bejaia.

Houston M. (2002) The Potential Application of *Spirulina (Arthrospira)* as a Nutritional and Therapeutic Supplement in Health Management. Disponible sur: <http://biomatsa.com/uploads/spiruline reprint JANA.pdf> (dernière consultation le 19 oct 2015)

Hug C. et Von Der Weid D. (2011). La spiruline. Antenna technologies . disponible sur : <https://www.antenna.ch/wp-content/uploads/2017/04/Spiruline-Bilan-et-perspectives.pdf> (dernier consultation septembre 2020).

Ichimura M., Kato S. et Coll L. (2013) Phycocyanin prevents hypertension and low serum adiponectin level in a rat model of metabolic syndrome. *Nutr Res.* 33: 397-405.

Ingrid C. et Martin W. (1999) Toxic Cyanobacteria in Water: A guide to their public health consequences, monitoring and management. London: E & FN Spon; 1999.

Jordan J. (1999). Cultivez votre spiruline: Manuel de culture artisanale, Genève, PP85,63.

Jordan J. (2006). Cultivez votre spiruline : manuel de culture artisanal Publication Antenna Technologies.

Jourdan J. (2014) *Manuel de culture artisanale de la spiruline*. 2014. Disponible sur <https://www.fichier-pdf.fr/2015/09/18/manuel-de-la-culture-artisanale-de-spiruline/manuel-e-la-culture-artisanale-de-spiruline.pdf> (dernière consultation janvier 2018)

Jourdan J. (2016) « Manuel de culture artisanale de spiruline ». 2016.

Jung F., Krüger-Genge A., Waldeck P. et Küpper J. H. (2019). *Spirulina platensis*, a super food ? *Journal of Cellular Biotechnology*, 5(1), 43-54.

Kim N-H., Jeong H-J., Lee J-Y., Go H., Ko S-G., Hong S-H. et Coll L. (2008) The effect of hydrolyzed *Spirulina* by malted barley on forced swimming test in ICR mice. *Int J Neurosci.* 118 : 1523-33.

Le Guehennec J. (2009) La spiruline. Edition :Terre d'Hommes. ISBN-13 :978-2917764077. 180 p.

Lison D., De Boeck M., Verougstraete V. et Kirsch-Volders M. (2001): Update on the genotoxicity and carcinogenicity of cobalt compounds, *Occup. Environ Med.*, V. 58, n°10, 619-625.

Loke M.F., Lui S.Y., Ng B.L., Gong M. et Bow H. (2007) Antiadhesive property of microalgal polysaccharide extract on the binding of *Helicobacter pylori* to gastric mucin. *Immunol Med Microbiol.* 50 : 231-8.

Lu H. K., Hsieh C. C., Hsu J. J., Yang Y. K. et Chou H. N. (2006). Preventive effects of *Spirulina platensis* on skeletal muscle damage under exercise-induced oxidative stress. *European journal of applied physiology*, 98(2), 220.

Lupatini A.L., Colla L.M., Canan C. et Colla E. (2017) Potential application of microalga *Spirulina platensis* as a protein source. *J Sci Food Agric* 2017;97:724–32.

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.

Mahavir J. (2013) SPIRULINA: THE BENEFICIAL ALGAE. Disponible sur: http://www.academia.edu/6281391/SPIRULINA_THE_BENEFICIAL_ALGAE. (dernière consultation le 15 mars 2016)

Marles R.J., Barrett M.L., Barnes J. et Coll L.(2011) United States Pharmacopeia Safety Evaluation of *Spirulina*. *Crit Rev Food Sci Nutr.* 51 : 593-604.

Mathew B., Sankaranarayanan R., Nair P.P., Varghese C., Somanthan T., Amma B.P., Amma N.S. et Nair M.K.(1995) :Evaluation of chemoprevention of oral cancer with *Spirulina fusiformis*.*Nutr Cancer*, V. 24, n°2, (1995), 197-202.

Mehandru S. et Dandekar S. (2008) Role of the gastrointestinal tract in establishing infection in primates and humans. *Curr Opin HIV AIDS* 2008; 3: 22–27

Onen C., Chong S., Kucuker Z. K., Wiczorek M. A., Cengiz N. et Kuchta K. (2020). *Bioplastic Production from Microalgae: A Review. International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(11), 3842.

Paniagua-Michel J., Dujardin E. et Sironval C. (1993) Le tecuiltlatl concentré de spirulines sources de protéines comestibles chez les Aztèques. *Cah Agric* 1993:283–7.

Park H.J., Lee Y.J. et Coll L. (2008) A randomized double-blind, placebo-controlled study to establish the effects of *spirulina* in elderly Koreans. *Ann Nutr Metab.*52 : 322-8

Pascaud M.(1993) The essential polyunsaturated fatty acids of *Spirulina* and our immune response. *Bulletin de l'Institut Océanographique Monaco*.

Patel S. et Goyal A. (2013) Current and prospective insights on food and pharmaceutical applications of spirulina. *Curr. Trends Biotechnol. Pharm.* p.681-95.

Pétrus M., Assih L., Horen B., Lapebie P., Trigatti A., Culerrier R. et Coll L. (2010). Premier cas d'allergie à la spiruline chez un enfant de treize ans. *Rev Fr Allergol*. P.470-2.

Puyfoulhoux G., Rouanet J. M., Besançon P., Baroux B., Baccou J. C. et Caporiccio B. (2001). Iron availability from iron-fortified spirulina by an in vitro digestion/Caco-2 cell culture model. *Journal of agricultural and food chemistry*, 49(3), 1625-1629.

Quillet M. (1975) Recherche sur les substances glucidiques élaborées par lesspirulines. *Ann. Nutr.Aliment.* 29(6), pages 553-561.

Raof B., Kaushik B. D. et Prasanna R. (2006) « Formulation of a low-cost medium for mass production of Spirulina », *Biomass Bioenergy*, vol. 30, no 6, p. 537-542, juin 2006.

Remirez D., Gonzalez R., Merino N., Rodriguez S. et Ancheta O. (2002) Inhibitory effects of Spirulina in zymosaninduced arthritis in mice. *Mediators of Inflammation*, 11 : 75-79

Rogowski J. (2008) « Spirulina platensis et ses constituants intérêts nutritionnels et activités thérapeutiques », Université Henri Poincaré - Nancy 1, 2008.

Sansone C., Brunet C., Noonan D. M. et Albini A. (2020). *Marine Algal Antioxidants as Potential Vectors for Controlling Viral Diseases*. *Antioxidants*, 9(5), 392.

Scheldeman P., Baurain D., Bouhy R., Scott M., Mühling M., Whitton B. A. et Wilmotte A. (1999). Arthrospira ('Spirulina') strains from four continents are resolved into only two clusters, based on amplified ribosomal DNA restriction analysis of the internally transcribed spacer. *FEMS microbiology letters*, 172(2), 213-222.

Sguera S. (2008). Spirulina platensis et ses constituants : intérêts nutritionnels et activités thérapeutiques (Doctoral dissertation, UHP-Université Henri Poincaré).

Shankar A. H. et Prasad A. S. (1998). Zinc and immune function: the biological basis of altered resistance to infection. *The American journal of clinical nutrition*, 68(2), 447S-463S.

Toudert M. et Bouzidi O. (2020) Intérêt de l'utilisation de la spiruline dans les aliments fonctionnels. Mémoire de master en, Agroalimentaire et Contrôle de Qualité , Université Akli Mohand Oulhadj – Bouira

Théodore Z. G. H. C. (2017). Optimisation de la culture de la spiruline en milieu contrôlé: éclairage et estimation de la biomasse (Doctoral dissertation, Toulouse 3).

Vicenete N. (2008) Spiruline et développement in international symposium 'spirulina and development' page 07.

Usharani G., Saranraj P. et Kanchana D. (2012). *Spirulina cultivation: a review. Int J Pharm Biol Arch*, 3(6), 1327-1341.

Vidal J.L. (2008) *Spiruline: l'algue bleue de santé et de prévention*. Paris: Ed. du Dauphin; 2008.

Watanabe F. (2007) Vitamin B12 sources and bioavailability. *Exp Biol Med* Maywood NJ 2007 ;232:1266–74.

Wershil B.K. et Furuta G.T. (2008) Gastrointestinal mucosal immunity. *J Allergy Clin Immunol* 2008; 121: S380–S383.

Yang C., Liu H., Li M., Yu C. et Yu G. (2008) « Treating urine by *Spirulina platensis* », *Acta Astronaut.*, vol. 63, no 7-10, p. 1049-1054, oct. 2008.

Zarrouk C. (1996) « Contribution à l'étude d'une cyanophycée Influence de divers facteurs physiques et chimiques sur la croissance et la photosynthèse de *spirulina maxima* (Setch et Gardner) Geitler », Université de Paris, 1966.

Webographie

- [1] <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/botanique-algue-2178/> (dernière consultation 14 mars 2022 15 :10)
- [2] <https://www.guidedesespeces.org/fr/algues> (dernière consultation 14 mars 2022 15 :30)
- [3] <https://www.thecanadianencyclopedia.ca/fr/article/algue-2> (dernière consultation 15 mars 2022 12 :20)
- [4] <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/botanique-cyanobacterie-122/> (dernière consultation 18 mars 2022 19 :10)
- [5] <https://www.ontario.ca/fr/page/les-algues-bleues> (dernière consultation 18 mars 2022 19:10)
- [6] <https://environnement.brussels/thematiques/eau/leau-bruxelles/etangs-et-cours-deau/les-algues-bleues-cyanobacteries> (dernière consultation 20 mars 2022 10 :45)
- [7] <https://www.spiform.fr/sa-composition-et-ses-bienfaits/> (dernière consultation 20 Avril 2022 18 :00)
- [8] <https://medecine-integree.com/la-spiruline/> (dernière consultation 20 Avril 2022 18 :10)
- [9] <https://fr.ulule.com/spirulina-solutions/> (dernière consultation 24 Avril 2022 18 :00)
- [10] <https://www.spirulinefrance.fr/bienfaits-spiruline/fatigue> (dernière consultation 21 Mai 2022 13:20)
- [11] <https://www.sens-nature.com/blog/les-bienfaits-de-la-spiruline-pour-notre-corps/>(dernière consultation 28 Avril 2022 10 :35)
- [12] <https://www.futura-sciences.com/tech/definitions/technologie-biotechnologie-15588/> (dernière consultation 06 Mai 2022 18:00)
- [13] <https://www.greentech.fr/wp-content/uploads/2020/11/C6.pdf> (dernière consultation 23 Mai 2022 21:00)

- [14] <https://genie-bio.ac-versailles.fr> (dernière consultation 23 Mai 2022 21:40)
- [15] <https://123dok.net/document/7qvg6dq5-optimisation-culture-spiruline-milieu-contrôle-eclairage-estimation-biomasse.html>(dernière consultation 26 Mai 2022 11:00)
- [16] <https://www.futura-sciences.com/planete/actualites/developpement-durable-greentech-bioalgastral-son-algocarburant-valorisant-dechets-46746/> (dernière consultation 27 Mai 2022 16 :15)
- [17] <https://www.dihe.fr/spiruline-formes.html> (dernière consultation 23 Mai 2022 15:09)

Résumés

Résumé

La présente étude bibliographique est consacrée sur la "Spiruline ". Une algue bleue appartenant à la famille des Cyanobactérie et au genre *Arthrospira*. On a essayé de mettre l'accent sur un élément naturel possédant de riches valeurs : nutritif, thérapeutique et cosmétique, dont la production et surtout l'industrialisation augmentent de jour en jour, au niveau mondial. En Algérie, elles restent tout de même chétives, et méritent une attention particulière de la part des scientifiques ainsi que des responsables pour la mise au point d'un programme en vue du développement de la spiruline car sa culture facile, sa haute productivité et son faible cout de production, peuvent être les causes de réduction voire de l'élimination de la malnutrition et la faim sur cette terre.

Mots clés : Cyanobactérie, *Arthrospira*, Spiruline, Culture, Nutritionnelle.

Abstract :

In the world, there are thousands of species of algae; they are aquatic organisms capable of performing photosynthesis. Blue algae: Cyanobacteria *Arthrospira Platensis* known as Spirulina is the most complete natural aliment on our planet. Because of its many qualities, nutritional: proteins, amino acids, essential fatty acids, vitamins and minerals, associated with high digestibility; therapeutic: activities on the immune system, effects against allergies, cancer and AIDS, cellular aging, anti-inflammatory and hepato-protective properties; it has been proposed in human food, many published scientific studies show it. On the other hand, its easy cultivation, its high productivity and its low cost of production, can be the causes of reduction or even elimination of malnutrition and hunger on earth.

This bibliographic study on Spirulina aims to highlight a natural element with rich values: nutritive, therapeutic and cosmetic, whose production and especially industrialization are continuously increasing in the world; unfortunately in Algeria, they still remain weak, and deserve special attention from scientists as well as officials for the development of a program for the improvement of spirulina.

Keywords: Cyanobacteria, *Arthrospira*, Spirulina, Culture, Nutritional.

ملخص

يوجد في جميع أنحاء العالم آلاف الأنواع من الطحالب. إنها كائنات مائية قادرة على أداء التمثيل الضوئي. أما الطحالب الزرقاء: البكتيريا الزرقاء *Cyanobactérie Arthrospira Platensis* والمعروفة باسم سبيرولينا فهي الغذاء الطبيعي الأكثر اكتمالا على كوكبنا. نظرا لصفاتنا العديدة، الغذائية: البروتينات والأحماض الأمينية والأحماض الدهنية الأساسية والفيتامينات والمعادن والمرتبطة بقبالية هضم الطعام العالية؛ وكذا العلاجية: أنشطة على جهاز المناعة، تأثيرات ضد الحساسية والسرطان والإيدز، شيخوخة الخلايا، خصائص مضادة للالتهابات ووقائية للكبد؛ لقد تم اقتراحه في غذاء الإنسان، مثلما تظهره العديد من الدراسات العلمية المنشورة. من ناحية أخرى، يمكن أن تكون الزراعة السهلة، الإنتاجية العالية والتكلفة المنخفضة للإنتاج، أسبابًا لتقليل أو حتى القضاء على سوء التغذية والجوع على الكرة الأرضية.

تهدف هذه الدراسة البيولوجية عن السبيرولينا إلى تسليط الضوء على عنصر طبيعي ذو قيم غذائية وعلاجية ومتعلقة بمستحضرات التجميل أيضا، والتي يتزايد إنتاجها وخاصة تصنيعها يوميا بعد يوم، في جميع أنحاء العالم؛ للأسف في الجزائر، لا يزال الاهتمام بها ضعيفا، ويستحق اهتماما خاصا من طرف الباحثين العلميين وكذلك المسؤولين لوضع برنامج لتطوير السبيرولينا.

الكلمات المفتاحية: البكتيريا الزرقاء ، أرثروسبيريرا ، سبيرولينا ، زراعة، التغذية.