

MAST-88-97 / 02

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID TLEMCEN
FACULTE DES SCIENCES, DE NATURE, DE LA VIE ET DE L'UNIVERT
DEPARTEMENT DE BIOLOGIE.

MEMOIRE

*En vue de l'obtention du diplôme de master
En Biologie*

*Option :
Sciences des aliments*



CONTRIBUTION A L'ETUDE DE LA COMPOSITION
CHIMIQUE DE LA SPIRULINE :
Spirulina platensis

Présenté par

✍ Mr EL KHLIFI Mohammed.

Inscrit Sous le N° 1393
Date le 2011 11 11
Cote

Soutenu le : 06 /07 /2011, devant le jury composé de:

Président: Mr LAZZOUNE. A

PMaitre de conférence

Encadreur : Mr DAHLOUM. L

Maître assistant

Examineur : Mr TEFIANI .c.

Maître asistant

Examineur: Mr BAGHDAD

Maître de conférence

MAST-813-97 / 02

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID TLEMCEN
FACULTE DES SCIENCES, DE NATURE, DE LA VIE ET DE L'UNIVERT
DEPARTEMENT DE BIOLOGIE.

MEMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de master
En Biologie

Option :
Sciences des aliments



CONTRIBUTION A L'ETUDE DE LA COMPOSITION
CHIMIQUE DE LA SPIRULINE :
Spirulina platensis

Présenté par

✍ Mr EL KHLIFI Mohammed.

Inscrit Sous le N° 1398
Date le 2011 11 11
Cote

Soutenu le : 06 /07 /2011, devant le jury composé de:

Président: Mr LAZZOUNE. A

PMaitre de conférence

Encadreur : Mr DAHLOUM. L

Maître assistant

Examineur : Mr TEFIANI .c.

Maître asistant

Examineur: Mr BAGHDAD

Maître de conférence



TABLE DE MATIÈRE

Dédicace.....	i
Remerciement.....	ii
Liste des abréviations.....	iii
Liste des tableaux.....	vi
Liste des figures.....	vii
Liste des photos.....	x
Résumé.....	xi
Introduction générale :.....	1
<i>Chap I : Synthèse bibliographique.....</i>	
<i>s/chap : caractéristique biologique de la spiruline.....</i>	
1/ Généralités sur la Spiruline.....	3
2/ Caractéristiques structurales :.....	4
3/ Croissance :.....	5
4/ Ecologie :.....	6
5/ Reproduction :.....	9
6/ Déplacement :.....	9
7/ Toxicité :.....	9
<i>s/chap : production de la spiruline.....</i>	
8/ Production de la spiruline :.....	11
8.1 Exploitation des ressources naturelles :.....	11

8.2 Cultures artisanales :.....	12
8.2.1 Facteurs climatiques :.....	12
a) <u>La température</u> :.....	12
b) <u>La pluviométrie</u>	12
8.2.2 Facteurs concernant les bassins de culture :.....	12
a) <u>Lieux d'implantation des bassins</u> :.....	12
b) <u>Construction des bassins</u> :.....	13
c) <u>Couverture</u> :.....	14
8.2.3 Systèmes d'agitation :.....	15
8.2.4 Milieu de culture :.....	15
8.2.5 Récolte :.....	17
8.2.6 Filtration :.....	17
8.2.7 Lavage et essorage :.....	18
8.2.8 Séchage :.....	19
8.2.9 Broyage :.....	21
8.2.10 Conditionnement et conservation :.....	21
8.3 Culture industrielle :.....	22
9/ Consommation de spiruline :.....	23
10/ Le marché de la Spiruline :.....	24
<i>Chap II : matériels et méthodes</i>	
1/ Choix et intérêt du microorganisme :.....	25
2/ Échantillonnage :.....	24
3/ Dosage des protéines totales :.....	24

3.1/ Principe :	24
3.2/ Mode opératoire :	25
3.2.1/Minéralisation :	25
3.2.2/Distillation :	25
3.2.3/Titration :	26
3.3/ Expression des résultats :	26
3.3.1/Azote total :	26
3.3.2/ Conversion du taux d'azote en taux de protéines :	27
4/ Dosage du fer :	27
4.1/ Matériels utilisés :	27
4.2/ Préparation de l'échantillon :	28
chapIII :Résultats discussion.....	
1/Les protéines :	29
2/ Le fer :	30
Conclusion.....	31
Références bibliographique	

*A l'aide de DIEU tout puissant, qui trace le chemin de ma vie j'ai pu arriver à
réaliser ce modeste travail que je dédie :*

A mes parents,

*Pour leur confiance, leur amour, leur
présence et leur soutien dans les épreuves
que la vie nous a réservées.
Qu'ils trouvent dans cette thèse le
témoignage de ma profonde reconnaissance
et de l'amour que j'ai pour eux.*

A mon grand père,

*six ans après ton « départ », ton absence est
toujours douloureuse à supporter. Tu m'as
insufflé une force et un courage qui m'ont
permis de reprendre mes études et d'être là
aujourd'hui.
Je te dédie cette mémoire.*

A tous les membres de ma famille,

IBTISSSEM, MERJEM, SARA, ET LA PETITE MAROUA

A mes très chers amis et frères,

ABDELHADI, NASSIMA, MOHAMMED, MOHAMMED, HOUCINE

*Merci pour votre soutien, votre présence et
votre amitié.*

A toute l'équipe de la Pharmacie SAHI,

*Merci pour votre accueil chaleureux, votre
gentillesse et vos précieux conseils.*

*Merci pour le temps que vous me consacrez
et pour les connaissances pratiques que vous
m'apportez.*

*C'est un immense plaisir de travailler en
votre compagnie.*

A toute ma promotion d'étude biologique.

Remerciements

Je tiens à remercier ici de tout mon cœur tous ceux qui, de près ou de loin, ont voulu contribuer à m'aider avec compréhension et bienveillance à mener à bien cette mémoire

*Je souhaite remercier **Mr DAHLOUM L** pour avoir dirigé cette mémoire sur la spiruline. Je lui adresse toute ma reconnaissance pour m'avoir guidée dans ce travail, pour sa grande disponibilité et ses critiques constructives.*

*Je remercie **Mr LAZZOUNI**, Maitre de conférences à l'université de Tlemcen, qui a bien voulu présider le jury de cette soutenance.*

*Ma gratitude va aussi à **Mr TEFIANI C**, maitre assistant à l'université de Tlemcen, d'abord pour ces cours et d'avoir accepté d'être un membre de jury de ma soutenance.*

*J'adresse mes remerciements sincères également à **Mr BAGHDAD**, maitre de conférence à l'université de Tlemcen, d'avoir accepté d'être un membre de jury de ma soutenance.*

*Je remercie infiniment à **AMOURI A**, je la remercie de son soutien et de son aide.*

Je suis très reconnaissante aux personnes du laboratoire de recherche de l'université » de Tlemcen pour le soutien qu'ils m'ont apporté, leurs accueils..

Liste des abréviations

FAO: Food and Agriculture Organisation.

OMS: Organisation Mondiale de la Santé.

FISE: Fonds International de Secours de l'Enfance.

SAA: Spectrophotomètre d'Absorption Atomique.

Liste des tableaux

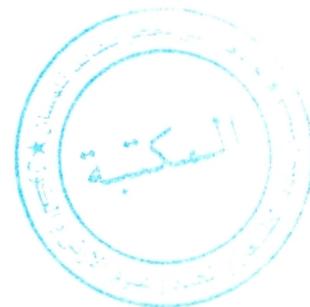
Tableau 01 : Sites géographiques où se trouve naturellement la spiruline.....	08
Tableau 02 : Composition chimique d'un milieu initial pour cultiver les spirulines.....	15
Tableau 03 : Résultat du dosage de protéines.....	29
Tableau 04 : Résultat du dosage de fer.....	30

Liste des figures

Figure 01 : Morphologies typiques de Spiruline.....	05
Figure 02 : Une femme kanembou « écrémant » la spiruline de la surface Lac Rombou au Tchad.....	10
Figure 03 : Vue du bassin de 21 m ² à Bujumbura en 2008 (Burundi).....	13
Figure 04 : Serre recouvrant un bassin artisanal de culture de Spiruline.....	13
Figure 05 : Toile de filtration contenant la spiruline récoltée.....	17
Figures 06 a (à gauche) et 06 b : A gauche : Presse type pressoir. Adroite : presse à vis.....	18
Figure 07 : Extrusion de spiruline.....	19
Figure 08 : Spaghetti de spiruline essorée à l'aide.....	19
Figures 09a et 09b : Armoire de séchage (au Bénin) chauffée au gaz permettant l'installation de neuf plateaux de spiruline essorée.....	20
Figure 10 : Evolution de la production mondiale de Spiruline.....	23

Liste des photos

Photo 01: Minéralisateur.....	26
Photo 02: Distillateur.....	26
Photo 03: Spectrophotomètre d'Absorption Atomique.....	28
Photo 04 : Four à moufle.....	28
Photo 05: Balance de précision.....	28



La spiruline, C'est un petit être aquatique, vieux comme le monde dont le nom scientifique est "cyanobactérie *Arthrospira platensis*", qui vit de photosynthèse comme les plantes et prospère naturellement dans les lacs salés et alcalins des régions chaudes du globe. Elle offre une source de complément alimentaire ou nutritionnel pour les couches défavorisées de différente population du monde

La très grande richesse de la composition chimique de la Spiruline lui confère un large potentiel d'utilisations. Outre dans le domaine de la malnutrition, elle est utilisée dans des domaines variés grâce à ces apports en micro-nutriments. Cette étude a permis de démystifier la spiruline et de mettre au point des techniques pour étudier cette algue, évaluer ses valeurs nutritionnelles et sa toxicité et de domestiquer la culture de la spiruline et l'exploiter à l'échelle industrielle.

Mots clés : spiruline ; caractéristique; malnutrition; spirulina platensis

S/chap :
Caractéristique
biologique de
la spiruline

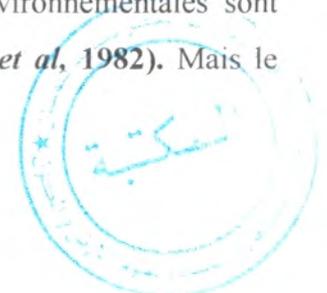
Introduction générale :

Le décalage entre l'accroissement démographique et la production alimentaire soulève des problèmes de jour en jour plus alarmants. De fait, la faim et la malnutrition existent dans de nombreux pays du monde. La malnutrition selon Kapsiotis (1967 in Busson, 1971) peut être le résultat combiné d'un manque énergétique (glucides, lipides) et de protéines. Beaucoup de pays en voie de développement souffrent de malnutrition par manque de protéines. Des organismes internationaux concernés par ces problèmes, tels la FAO (Food and Agriculture Organisation), l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé), le FISE (Fonds International de Secours de l'Enfance), ont recommandé aux chercheurs du monde entier de réexaminer les potentiels alimentaires de l'humanité dans ses sources conventionnelles, semi-conventionnelles et non conventionnelles. En fait, pour accroître les ressources alimentaires de l'humanité, il faudrait s'intéresser aux sources non conventionnelles, c'est à dire, à celles qui n'ont pas été ou peu exploitées jusqu'ici. Dans ce sens, de nombreuses micro algues, notamment les *Chlorelles*, *Scenedesmus*, *Coelastrum* et la cyanobactérie Spiruline, ont depuis longtemps retenu l'attention des chercheurs comme sources de protéines (**Kihlberg, 1972 in Rao, 1981**).

La Spiruline est de taille assez importante (jusqu'à 200-500 μm) qui lui permet de produire une biomasse techniquement facile à récolter. Elle présente le grand avantage, par rapport aux autres microorganismes, d'avoir été consommée spontanément depuis des siècles et de l'être encore aujourd'hui par certaines populations. Ainsi, au Mexique, les Aztèques récoltaient la Spiruline locale du lac Texcoco et l'utilisent comme complément alimentaire (**Farrar, 1966**). Dans les lacs de la région du Kanem au Tchad, la Spiruline locale est traditionnellement récoltée, séchée sous forme de galette, et vendue au marché sous le nom de «dihé» (**Leonard, 1966**).

L'Algérie possède en effet un gisement naturel de Spiruline, en particulier à proximité de la wilayat de Tamanrasset.

La présente étude a été menée en considérant que la Spiruline, en raison de sa composition en micronutriments, pourrait apporter une contribution à la lutte contre l'insécurité alimentaire dans les pays en voie de développement et en Algérie en particulier. De nombreux pays en développement sont situés dans la zone intertropicale, caractérisée par une forte luminosité et des températures élevées. Ces conditions environnementales sont particulièrement favorables à la croissance de la Spiruline (**Vonshak et al, 1982**). Mais le



premier facteur limitant l'extension de la culture de la Spiruline dans les pays en développement est la disponibilité en eau douce.

Ainsi dans le cadre de la présente étude, le principal objectif est d'évaluer la valeur nutritive de la spiruline (*Spirulina platensis*) cultivée en bassin à la wilayat de Mostaganem (Algérie).

Pour ce faire, la première partie de ce travail cadre notre étude en s'appuyant essentiellement sur des références bibliographiques : elle consiste en une présentation de la Spiruline, des gisements naturels, des techniques de production artisanale et industrielle ainsi que le mode de consommation de la spiruline. Enfin, tenant compte des résultats expérimentaux dans la deuxième partie, nous proposons de promouvoir la culture de cette micro algue en Algérie.

Chap I :
Synthèse
bibliographique

1/ Généralités sur la Spiruline

La spiruline fait partie des micro-organismes : ni végétale ni animale, elle est classée parmi les **cyanobactéries** (König C, 2011). Ce groupe comprend l'ensemble des bactéries autotrophes, c'est-à-dire capables d'utiliser l'énergie de la lumière pour la photosynthèse. (Roger P.A, 2011)

Mais, contrairement aux algues et aux plantes également dotées de ce pouvoir photosynthétique, elle appartient à l'embranchement des procaryotes, car elle n'a pas de noyau bien individualisé. A noter que cette appartenance à la classe des cyanobactéries est récente. En effet, elle est longtemps restée classée parmi les « algues bleu-vert », ce pour plusieurs raisons :

- Son habitat aquatique,
- La présence d'un système photosynthétique producteur d'oxygène,
- Son aptitude à développer des biomasses importantes,
- Sa morphologie proche de celle des algues,
- Sa couleur liée à sa teneur en pigments bleu (phycocyanine) et vert (chlorophylle).

Il existe à ce jour 200 genres et environ 1 500 espèces de cyanobactéries connues ; étant très difficiles à détecter, il en reste sans doute encore beaucoup à découvrir. La spiruline est la plus connue de toutes ; d'un point de vue taxonomique, elle appartient à l'ordre des *Nostocales*, à la famille des *Oscillatoriaceae* et au genre *Arthrospira*. (Fox D, 1999) (Scheldeman P, 2005)

A noter qu'il y a parfois malheureusement un véritable méli-mélo entre les termes "Spiruline", "Spirulina" et "Arthrospira". Ces confusions proviennent à la fois d'erreurs de déterminations scientifiques dans les années 1950 et de la dénomination commerciale de certaines cyanobactéries alimentaires.

En pratique, il faut retenir que le terme "Spiruline" correspond au nom commercial d'une espèce de cyanobactérie alimentaire appartenant toujours au genre *Arthrospira*. Le mot "Spirulina" est le nom commercial anglophone de la spiruline, mais il désigne également un genre de cyanobactérie assez éloigné de *Arthrospira*, et surtout non comestible (par exemple : *Spirulina major*, *Spirulina subtilissima*, *Spirulina princeps*, *Spirulina gigantea* ou *Spirulina subsalsa*). (Scheldeman P, 2005)

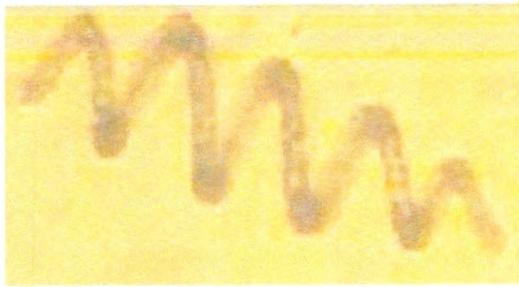
2/ Caractéristiques structurales :

La spiruline se présente sous la forme d'un filament pluricellulaire bleu-vert, mobile, non ramifié et enroulé en spirale. Ce filament est appelé trichome ; sa forme hélicoïdale, observable uniquement en milieu liquide, est caractéristique du genre. C'est d'ailleurs de là que la spiruline tient son nom. Par ailleurs, contrairement à certaines autres cyanobactéries (*Anabaena*, *Nostoc*), la spiruline ne possède pas les cellules spécialisées permettant la fixation de l'azote de l'air (hétérocystes). La longueur moyenne du filament est de 250 µm lorsqu'il a 7 spires et son diamètre est d'environ 10 µm. Mais les paramètres de l'hélice (épaisseur, longueur) ne sont pas toujours les mêmes selon les chercheurs qui étudient la spiruline. Ainsi, le genre *Arthrospira* a été retrouvé en maints endroits dans le monde et, il a été constaté une grande variation dans la taille et la forme des trichomes. (Cruchot H, 2008)

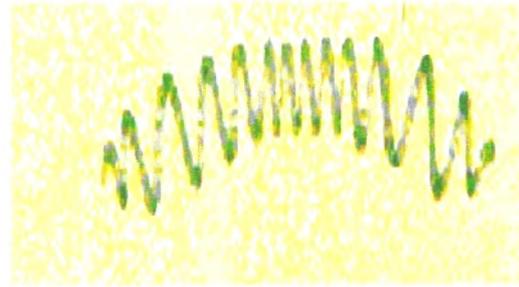
Actuellement, 50 souches d'*Arthrospira* recensées à travers le monde ont été étudiées pour en décrire la diversité génétique. Celui-ci repose sur le séquençage génétique d'un fragment d'ADN hypervariable, mais spécifique des cyanobactéries. Il en ressort une très forte homogénéité du genre *Arthrospira*, même lorsque les souches ont des morphologies variées ou lorsqu'elles proviennent de lieux géographiques très différents. Leur conclusion est qu'il n'existerait *a priori* que deux espèces génétiquement différentes parmi ces souches (Antenna T, 2007) : *Arthrospira platensis*, initialement originaire du Kanem (Tchad) et *Arthrospira geitleri* ou *maxima*, originaire du Mexique. (Cruchot H, 2008)

❖ *Spirulina platensis* (figure 1) est la plus connue et la plus utilisée lors des travaux de recherche ou lors de l'ensemencement de nouvelles cultures. Elle se compose de 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 spire ont un diamètre de 20 à 50 µm, diminuant légèrement vers les extrémités. (Scheldeman P, 2005)

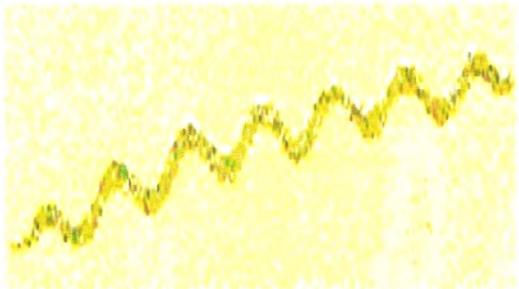
❖ *Spirulina maxima* se caractérise par des trichomes de 70 à 80 µm de long, de 7 à 9 µm de diamètre et légèrement effilés aux extrémités ; ils forment une spirale régulière de 3 à 8 tours et de 40 à 60 µm de diamètre. Les cellules constituant les trichomes mesurent entre 5 à 7 µm de long et ne rétrécissent pas au niveau des articulations. (Scheldeman P, 2005)



Forme spiralée (type « Toliara »)



Forme spiralée (type « Lonar »)



Forme ondulée (type « Paracas »)



Forme droite (type « M2 »)

Figure 01 : Morphologies typiques de Spiruline

(Source : Antenna Technologie)

La microscopie électronique a aussi permis de mieux connaître la structure et le fonctionnement de ces cellules. Leur organisation est relativement simple et semblable à celle des cellules de procaryotes :

- Absence de membrane nucléaire et donc de noyau bien individualisé ;
- Absence de mitochondries, réticulum endoplasmique, appareil de Golgi, et flagelles ;
- Les cellules sont limitées par une fine membrane constituée de 4 couches minces

différenciables en microscopie électronique : deux d'entre elles présentent une analogie chimique et structurale avec la paroi des bactéries gram négatif car elles sont riches en mucopolymères et mucopeptides. Elles sont néanmoins un peu plus complexes, mais il est important de retenir que cette membrane est totalement exempte de cellulose. Une enveloppe externe, riche en caroténoïdes, peut parfois l'enrober. (König C, 2011) (Doumenge F, et al,1993)

3/ Croissance :

Grâce à ses pigments chlorophylliens, la spiruline est une espèce photo-autolitotrophe aérobie. Par conséquent, contrairement aux bactéries photo-autotrophes anaérobies qui n'ont que le photosystème I, elle est dotée des photosystèmes I et II. (Merceron M, 2006)

Chez la spiruline, la photosynthèse constitue la clé de sa croissance. Ce processus est un phénomène physiologique d'importance capitale, puisqu'il est indispensable à toute forme de vie animale et humaine. Ainsi sous l'action de la lumière, un organisme photosynthétique peut élaborer de la matière organique indispensable à son développement : il le fait à partir d'éléments minéraux, en absorbant le gaz carbonique et l'eau, et en rejetant de l'oxygène.

Pour sa photosynthèse, la spiruline a besoin d'eau, de carbone, et d'éléments nutritifs dont l'azote en particulier. Elle assimile une source de carbone minéral (le CO₂ atmosphérique) et la convertit en énergie biochimiquement utilisable représentée par le glucose. **(Scheldeman P) (Doumenge F et al, 1993)**

La formule générale de la photosynthèse peut donc s'écrire de la façon suivante :



Bien que la spiruline ne renferme que de la chlorophylle de type a, il en existe d'autres sortes, en particulier chez d'autres types d'algues : les chlorophylles b, c et d.

Par ailleurs, le seul prédateur de la spiruline est le flamant rose ; mais c'est aussi cet animal qui lui fournit, par l'intermédiaire de ses fientes, les éléments dont elle a besoin pour sa croissance. **(Cruchot H, 2008)**

4/ Ecologie :

Ce qui distingue le genre *Arthrospira* des autres cyanobactéries, c'est le milieu naturel où elles vivent. En effet, les spirulines prolifèrent dans des eaux très minéralisées, extrêmement alcalines et chaudes. Ces conditions environnementales très contraignantes excluent la plupart des autres êtres vivants. De plus, le développement des spirulines dans ces milieux contribue encore à renforcer l'effet d'exclusion, par trois phénomènes **(Scheldeman P, 2005) (Doumenge F et al, 1993)**

- ✓ En consommant les carbonates et bicarbonates de son milieu, la spiruline tend à augmenter l'alcalinité de celui-ci ;
- ✓ Ses filaments pigmentés et flottants forment un écran qui prive de lumière solaire les rares algues qui pourraient s'accommoder du milieu de culture (exemple de la chlorelle, microalgue comestible pouvant proliférer dans des cultures de spirulines trop peu concentrées) ;
- ✓ en sécrétant des molécules qui s'avèrent actives contre une vaste gamme de bactéries.

D'autre part, le flamant rose nain, *Phoeniconaias minor*, a joué dans le passé un rôle de vecteur aérien pour la spiruline, laquelle a ainsi pu coloniser progressivement de nouveaux

habitats. En effet, les flamants ont pour habitude de voler sur de longues distances pour rechercher de la nourriture. Or, la spiruline s'accrochant aux écailles de leurs pattes et à leurs plumes, elle s'est trouvée ainsi transportée dans d'autres lacs alcalins où elle a pu proliférer.

A l'état naturel, la spiruline est donc retrouvée dans des lacs de la ceinture intertropicale du globe terrestre (tableau I), dont les eaux sont riches en carbonate de sodium (Na_2CO_3), bicarbonate de sodium (NaHCO_3), divers minéraux et une source d'azote fixé. Ces lacs sont situés approximativement entre 35° de latitude Nord et 35° de latitude Sud ; ils sont peu profonds et agités par des vents légers. En dehors des sites cités dans le tableau I, d'autres endroits sont possibles, notamment partout où vivent le flamant nain (Afrique et Asie) et le flamant de James, *Phoenicoparrus jamesi* (Amérique du sud). **(Lee J-B, 2000)**

Tableau 01 : Sites géographiques où se trouve naturellement la spiruline.
(Scheldeman P, 2005)

Noms des pays	Localisations précises
Algérie	Tamanrasset
Tchad	Région du Kanem : lacs Latir, Ouna, Borkou, Katam, Yoan, Leyla, Bodou, Rombou, Moro, Mombolo, Liwa, Iseirom, Ounianga kebir
Soudan	Cratère de Djebel Marra
Djibouti	Lac Abber
Ethiopie	Lacs Aranguadi, Lesougouta, Nakourou, Chiltu, Navasha, Rodolphe
Congo	Mougounga
Kenya	Lacs Nakuru, Elmenteita, Cratère, Natron
Tanzanie	Lac Natron
Tunisie	Lac Tunis; Chott el Jerid
Zambie	Lac Bangweoulou
Madagascar	Beaucoup de petits lacs près de Toliara
Inde	Lacs Lonar et Nagpur, réservoir près de Madurai
Myanmar	Lacs Twyn Taung, Twyn Ma et Taung Pyank
Sri Lanka	Lac Beira
Pakistan	Mares près de Lahore
Thaïlande	Lacs d'effluents d'une usine de tapioca, province de Radburi, 80 km au Sud-Ouest de Bangkok
Azerbaïdjan	
Pérou	Réservoir d'eau près de Paracas, Près de l'île d'Amantani dans le lac Titicaca
Mexique	Lac Texcoco ; Lac Cratère
Uruguay	Montevideo
Equateur	Lac volcanique Quillotoa : cratère de 1km de diamètre
Californie	Oakland ; Del Mar Beach
Haïti	Lac Gonâve
Rép.Dominicaine	Lac Enriquillo
Hongrie	
France	Camargue

5/ Reproduction :

Son mode de reproduction est la bipartition par scission simple. C'est une reproduction asexuée, par segmentation des filaments ; ce processus ne doit pas être confondu avec la mitose, laquelle n'existe que chez les eucaryotes. **(König C, 2011)**

Sa vitesse de multiplication est particulièrement rapide dès que la température dépasse 30°C à l'ombre ; lorsque ces conditions sont réunies et que le milieu est favorable, le temps de génération est très court (7 heures). Les filaments microscopiques se développent simultanément et ils constituent des "fleurs d'eau" également appelés "blooms". **(Mitchell GV, 1990)**

6/ Déplacement :

La spiruline est capable d'effectuer deux types de déplacement : la **motilité** et la **flottabilité**.

. La spiruline évolue dans l'eau en se vissant ; ce déplacement s'effectue à la vitesse de 5µm par seconde. **(Doumenge F et al, 1993)**

❖ Au cours de la conférence alimentaire mondiale en 1974, la spiruline a été déclarée « meilleure source alimentaire du futur » par l'Organisation des Nations Unies (ONU) **(Doumenge F, et al, 1993)**

7/ Toxicité :

Avec des décennies de recul concernant la consommation de spiruline par certaines populations, et, à l'issue des nombreuses études menées par des chercheurs spécialisés dans le domaine des cyanobactéries, il ressort que la spiruline (genre *Arthrospira*) n'est pas toxique, contrairement à la plupart des autres cyanobactéries **(Delpeuch F, 1976)(Chamorro-Cevallos G, 1980)**. Ces dernières produisent en effet un grand nombre de métabolites bioactifs, parmi lesquels des toxines : neurotoxines (anatoxine-A, β -N-méthylamino-L-alanine), hépatotoxines (microcystine) ou hématoxines, responsables de cas d'empoisonnements humain ou animal. **(Boudène C, 1975)**

Mais, le genre *Arthrospira* ne possédant pas les gènes assurant la synthèse de ces toxines, la spiruline destinée à l'alimentation humaine a été autorisée à la vente depuis de nombreuses années dans les pays industrialisés. Aux Etats-Unis, la spiruline est classée "GRAS" (Generally Recognized As Safe) par la Food and Drug Administration (FDA). En France, le Comité Supérieur d'Hygiène Publique a donné, en 1984, un avis favorable pour la consommation humaine de toutes les spirulines. **(Doumenge F et al, 1993)**

8/ Production de la spiruline :

En dehors de la "cueillette" de la spiruline issue des lacs où elle pousse naturellement, la spiruline doit être produite si on veut couvrir la demande. Or, le seul moyen de la produire en grande quantité est la culture en bassins.

En fonction de la surface totale d'exploitation des bassins et des moyens technologiques utilisés, on distingue la culture familiale, la culture artisanale et la culture industrielle. (Jourdan J.P, 2007)

8.1 Exploitation des ressources naturelles :

L'exploitation des lacs où pousse naturellement la spiruline constitue un moyen d'en obtenir. Mais, il ne faut pas pour autant les surexploiter. La spiruline qui s'y trouve a, en effet, plusieurs utilités :

- Nourrir des enfants en état de malnutrition ;
- Faire vivre les flamants qui se trouvent dans ces lacs ;
- Servir de réservoir de souches de spiruline naturelle, utilisables pour débiter et maintenir les cultures de fermes commerciales de spiruline. (Doumenge F, 1993)

Il est possible de pomper l'eau du lac, de l'envoyer directement sur les tamis de récolte et de sécher la bouillie de micro-algue au soleil. C'est la méthode la plus simple, la moins chère et la plus rapide à mettre en place. Certes, le produit obtenu est comestible et consommable, mais sa qualité n'est pas suffisante pour être commercialisé. D'autre part, par cette méthode, l'écosystème est menacé. (Scheldeman P, 2005)



Figure 02 : Une femme kanembou « écrémant » la spiruline de la surface
Lac Rombou au Tchad. (VICENTE ,2008)

8.2 Cultures artisanales :

Une méthode plus raisonnable consiste à construire des bassins près du lac, à y envoyer l'eau filtrée puis à renvoyer au lac l'eau usée. Ce système permet d'obtenir un produit de haute qualité pour la consommation humaine (filtration avec filtre de 50 µm avant l'arrivée dans les bassins) et également une récolte d'algues moins pure (filtre 150 µm), utilisable pour l'aviculture ou l'aquaculture, tout ceci sans déranger l'écosystème. Cette méthode nécessite la construction d'un réservoir en béton de 60 m² pour chaque surface de production égale à 3 000 m². L'eau pompée du lac arrive dans le réservoir, puis passe par gravité dans un filtre à sable avant d'arriver dans les bassins artificiels de culture de spiruline (Scheldeman P, 2005).

8.2.1 Facteurs climatiques :

a) La température :

La spiruline pousse idéalement lorsque la température du milieu de culture est de 37°C. Des températures supérieures à 40°C ne lui conviennent pas, et, elle meurt lorsqu'elle est exposée à 43°C. Par ailleurs, à 20°C, sa croissance est pratiquement nulle. (Jourdan J.P, 2007)

b) La pluviométrie :

La conduite de bassins de culture nécessite un minimum de ressources en eau. Les eaux de pluie sont intéressantes car propres et minéralement neutres. La teneur en eau du milieu doit impérativement être constante. Le manque ou l'excès d'eau sont néfastes. Sous les climats à faible pluviométrie, ou à saison sèche longue, il est donc nécessaire de prévoir une citerne pour stocker de l'eau de pluie, laquelle sert à compenser l'évaporation des bassins. (Scheldeman P, 2005)

8.2.2 Facteurs concernant les bassins de culture :

a) Lieux d'implantation des bassins :

Le lieu d'implantation des bassins ne doit pas se faire au hasard mais après mûre réflexion. En effet, il faut respecter quelques règles *a priori* pas toujours évidentes : ne pas

construire les bassins sous des arbres (besoin d'ensoleillement), ni en un lieu inondable, ni près d'une route ou d'une industrie (pollution). **(König C, 2011)**

Il est également préférable d'avoir une source d'eau à proximité des bassins. Certes la croissance de la spiruline ne requiert que peu d'eau, mais les lavages sont abondants (nettoyage des toiles de filtration, des ustensiles utilisés, lavage des bassins en cours de rénovation, etc.). De plus, la propreté du matériel et du personnel de production doit être irréprochable pour limiter les risques de contamination des cultures. **(Mitchell GV, 1990)**

b) Construction des bassins :

Les bassins en dur sont faits avec du béton renforcé, du ciment, des pierres cimentées, des parpaings, des briques, etc. Ce sont les plus durables (durée moyenne de 10 ans) et les plus faciles à nettoyer, mais aussi les plus chers. L'idéal est de les construire sur une dalle en béton armé de 10 cm d'épaisseur minimum, coulée sur un terrain bien compacté. **(Cruchot H, 2008)**

Globalement, il faut retenir que les bassins sans garniture intérieure ne sont pas satisfaisants, car on retrouve des grains de sable fin ou des particules d'argile dans le produit fini, du fait de l'agitation. C'est pourquoi la dalle en ciment ou en béton est fortement conseillée. **(Jourdan J.P, 2007) (Darcas C, 2000)**

Concernant la physionomie des bassins, il est recommandé qu'ils soient de forme arrondie et sans angles vifs. Leur fond doit être aussi plan que possible, avec une légère pente vers un endroit plus creux d'accès facile pour faciliter la vidange. L'expérience montre que la profondeur idéale est comprise entre 20 et 40 cm. A titre indicatif, voici les surfaces requises pour les autres types de production de spiruline : **(Jourdan J.P, 2007)**

- 50 à 100 m² pour une production artisanale ;
- 1 000 m² et plus pour une production semi-artisanale ;
- 5 000 m² maximum pour une production industrielle.



Figure 03 : Vue du bassin de 21 m² à Bujumbura en 2008 (Burundi)
Photo Didier Hiberty

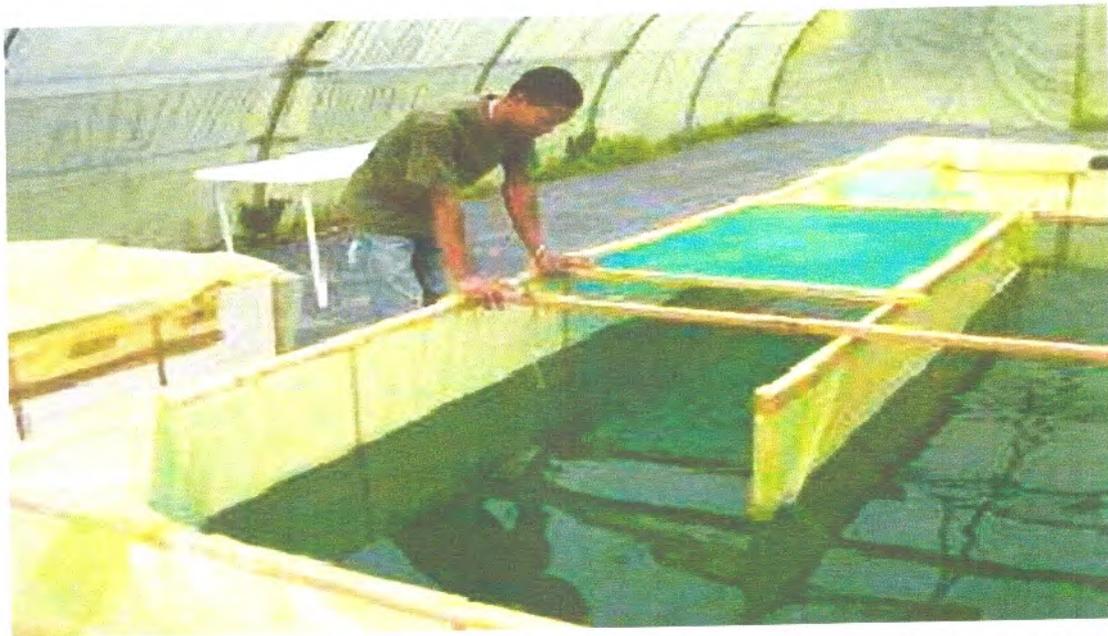


Figure 04 : Serre recouvrant un bassin artisanal de culture de Spiruline (VICENTE ,2008)

c) Couverture :

Il est souvent utile, voire nécessaire, d'installer une serre ou au moins un toit sur le bassin (figure 03) : cela permet de le protéger contre les excès de pluie, de soleil ou de froid, et contre les chutes de feuilles, fientes d'oiseaux, vents de sable et débris divers, tout en lui permettant de "respirer". (Scheldeman P, 2005)

Le toit peut être en toile de tente blanche ou en tissu polyamide enduit PVC blanc laissant passer une partie de la lumière mais capable d'arrêter suffisamment la pluie. Il peut aussi être en plastique translucide. Les films utilisés doivent être stabilisés contre les rayons UV et ne pas poser de problème de sécurité alimentaire. Des orifices d'aération et/ou d'accès doivent être prévus, ainsi qu'un dispositif d'ombrage. (Jourdan J.P, 2007) (Manen JF et al, 2002)

8.2.3 Systèmes d'agitation :

Une exposition directe à un fort soleil provoque la photolyse des filaments de spiruline. L'agitation du milieu de culture constitue un bon moyen d'éviter la photolyse sans modifier l'intensité lumineuse, en mettant alternativement les filaments à la lumière et à l'ombre. (Cruchot H, 2008)

L'agitation permet également de s'assurer que les filaments ne restent pas dans des micro-zones où les éléments nutritifs essentiels sont épuisés. (Jourdan J.P, 2007)(Ballinger AB, 1994)

8.2.4 Milieu de culture :

Les spirulines vivent dans une eau à la fois salée et alcaline. L'eau utilisée pour le milieu de culture doit être potable sans sentir le chlore. Pour ce qui est de la quantité d'eau nécessaire pour la constitution du milieu initial, il est important de savoir par exemple, qu'une surface totale de culture de 1 000 m² exige 200 m³ d'eau. (Cruchot H, 2008)

Les eaux trop dures sont à éviter car elles peuvent gêner la culture en formant des boues minérales, surtout lorsque l'ensemencement initial en spiruline n'est pas assez concentré. (Belay A et al, 1996)(Qishen P, 1988)

En général, les eaux de pluie, de source ou de forage conviennent bien.

La salinité est apportée par les produits chimiques servant d'engrais et complétée par du chlorure de sodium. (Cruchot H, 2008)

L'alcalinité est apportée sous forme de bicarbonate de sodium ou, à défaut, à partir de soude caustique ou de carbonate de sodium, En pratique, la composition des milieux de culture est variable, en fonction de la disponibilité ou du prix d'achat des produits chimiques nécessaires à leur élaboration. (Belay A et al, 1996)

Le pH initial du milieu doit être assez élevé (entre 7,8 et 8,5). Le pH d'une culture florissante doit ensuite se situer entre 9,5 et 10,5.

La salinité, correspondant à la somme des poids de tous les sels dissous dans le milieu, doit être au minimum égale à 13 g/litre. (Jourdan J.P, 2007) (Belay A et al, 1996)

Les produits chimiques jouant le rôle d'engrais pour assurer la croissance de la spiruline sont appelés les "intrants" : ils doivent contenir de l'azote, du phosphore et du potassium ; ces éléments classiques existent sous des formes variées. D'autre part, le soufre, le magnésium, le calcium et le fer doivent aussi être ajoutés dès lors qu'ils ne sont pas apportés en quantité suffisante par l'eau, le sel et les engrais. (Jourdan J.P, 2007)

Les sources d'azote préférées des spirulines sont l'ammoniac et l'urée, mais ces produits sont toxiques au-delà d'une concentration limite. L'azote est donc le plus souvent apporté par du nitrate, dont on peut mettre sans danger une forte dose, afin de constituer une réserve d'azote à long terme. (Cruchot H, 2008)

Tableau 02 : Composition chimique d'un milieu initial pour cultiver les spirulines. (Jourdan J.P, 2007).

Nom de l'intrant	g/L
Bicarbonate de sodium	8
Chlorure de sodium	5
Nitrate de potassium	2
Sulfate de potassium	1
Phosphate monoammonique	0,2
Sulfate de magnésium	0,2
Urée	0,02
Chaux	0,02
Sulfate de fer	0,005

Au cours de la culture, plusieurs paramètres sont à contrôler régulièrement : (Henrikson R, 2000)

- *La température du milieu* (température optimale : 35°C) ;
- *Le pH du milieu* (pH optimum compris entre 9,5 et 10,5) ;
- *La salinité du milieu* (13 g/L au minimum) ;
- *Le niveau d'eau des bassins* : il faut ajouter quotidiennement (de préférence le soir) de l'eau dans les bassins, de façon à maintenir le niveau de départ, c'est-à-dire environ 20 cm ; cette eau sert à compenser l'évaporation qui a eu lieu dans la journée. Pour

éviter de mettre en péril la culture, la quantité d'eau ajoutée ne doit pas dépasser plus de 10 % du volume du bassin ;

- La *concentration en spiruline*
- La *fréquence d'agitation* (minimum 4 fois par jour)

Par ailleurs, il faut savoir que tant que la spiruline est en croissance active, bien nourrie, récoltée, agitée, à pH > 9,5, d'une belle couleur vert foncé et que le milieu est régulièrement purgé, aucune espèce d'algue concurrente ne réussit habituellement à envahir le bassin. Cependant, l'apparition d'algues étrangères est toutefois possible, par exemple l'hiver en zone tempérée, sans que l'on s'en rende compte (**Belay A, Ota Y, 1994**). C'est pourquoi il est prudent de faire examiner (une ou deux fois par an), un échantillon de culture dans un laboratoire équipé d'un bon microscope. Bien entendu, il faut que le laborantin soit entraîné à reconnaître ce qui n'est pas de la spiruline. (**Cruchot H, 2008**)

8.2.5 Récolte :

La récolte doit être organisée de façon à maintenir un flux continu entre matières premières et produit fini ; ainsi, une récolte régulière (tous les deux jours) permet à la culture de garder un rythme de croissance exponentiel. (**Sorto M, 2003**)(**Langlade M.J, 2006**)

Une fois la culture prête pour la récolte, on doit pouvoir prélever au moins 25 % de la culture par jour.

D'autre part, l'expérience prouve qu'il est préférable de pratiquer la récolte le matin de bonne heure, car la teneur de la spiruline en protéines y est généralement plus élevée que le soir. (**Jourdan J.P, 2007**)

8.2.6 Filtration :

La récolte consiste d'abord à filtrer une partie de la culture sur une toile très fine (maille de 30 à 60 µm) de manière à recueillir la spiruline sur la toile et à laisser passer le filtrat qui pourra être réutilisé dans le bassin de production.

Afin de récolter une spiruline aussi pure que possible, il est conseillé de disposer de trois tamis superposables de maillage différent. (**Doumange F et al, 1993**)

Après un temps variable selon l'importance de la récolte et la concentration de la spiruline dans le milieu (entre 30 minutes et une bonne heure), la pâte verte de spiruline qui s'est accumulée sur le filtre peut être récupérée. (Jourdan J.P, 2007)

La consistance de la biomasse obtenue dépend de la santé de la culture : une culture neuve donne une biomasse facile à récolter, car s'agglomérant bien, alors qu'une culture plus ancienne ou en mauvais état donne une pâte très liquide car renfermant un pourcentage d'eau très élevé. (Cruchot H, 2008)



Figure 05 : Toile de filtration contenant la spiruline récoltée.

Source : TECHNAP/CREDESA 2001.

Bien entendu, la biomasse doit être récoltée rapidement, afin de ne pas la laisser traîner à l'air libre : il s'agit d'éviter les fermentations provoquées par la décomposition des protéines et également toute contamination provenant de l'extérieur. (Doumenge F et al, 1993)

8.2.7 Lavage et essorage :

Lorsque la culture est sale, malodorante ou trop salée, conseille de laver la biomasse avec de l'eau douce potable avant le pressage et le séchage. **J.P Jourdan**

L'essorage est réalisé par pression. La biomasse égouttée est, si possible, transférée dans une autre toile fine, enveloppée elle-même dans un linge ordinaire. Le paquet ainsi constitué est ensuite placé dans une presse à vis (figure 06 b) ou sous une lourde charge (figure 06 a).

Le temps de pressage dépend essentiellement de la qualité de la biomasse : une biomasse ferme ne nécessite que 10 à 15 minutes de pressage alors qu'une pâte très liquide

requiert plus de 20 minutes. Dès l'apparition du liquide vert passant à travers la toile de pressage, il est conseillé de stopper les opérations.

La biomasse ainsi pressée contient environ 20 % de matière sèche. (Cruchot H, 2008)



Figures 06 a (à gauche) et 06 b : A gauche : Presse type pressoir. Adroite : presse à vis
TECHNAP/CREDESA 2001.

8.2.8 Séchage :

Le séchage est le seul moyen sûr de conserver et de distribuer la spiruline sans chaîne de froid. Lorsque la spiruline pressée ne peut être séchée de suite, il faut la conserver dans un récipient fermé, au réfrigérateur bien froid et pas trop longtemps (sinon elle dégage une odeur désagréable lors de l'extrusion).

La spiruline "égouttée" contient environ 90 % d'eau. La spiruline essorée en contient encore près de 80 %. Or, la spiruline séchée ne doit pas contenir plus de 7 à 8 % d'eau. Comme le séchage doit être suffisamment rapide pour que le produit sèche sans fermenter, la biomasse issue du pressage est préalablement répartie par extrusion en "spaghetti", sur un plateau formé d'un cadre garni d'une moustiquaire en nylon ou en inox (maille 1 mm) (Figure 08). L'extrusion peut aussi se faire à l'aide d'un décorateur de gâteau ou avec un poussoir à saucisses. (Figure 07) (Darcas C, 2000)



Figure 07 : Extrusion de spiruline
TECHNAP/CREDESA 2001.



Figure 08 : Spaghetti de spiruline essorée à l'aide
TECHNAP/CREDESA 2001.

Une fois extrudée, la spiruline est séchée au soleil, ou mieux, dans un courant d'air à faible humidité relative (séchoir solaire indirect, ou électrique, ou à gaz, ou déshumidificateur), jusqu'à ce qu'elle ne soit plus molle du tout. Elle se détache alors facilement du support plastique et se broie aisément.

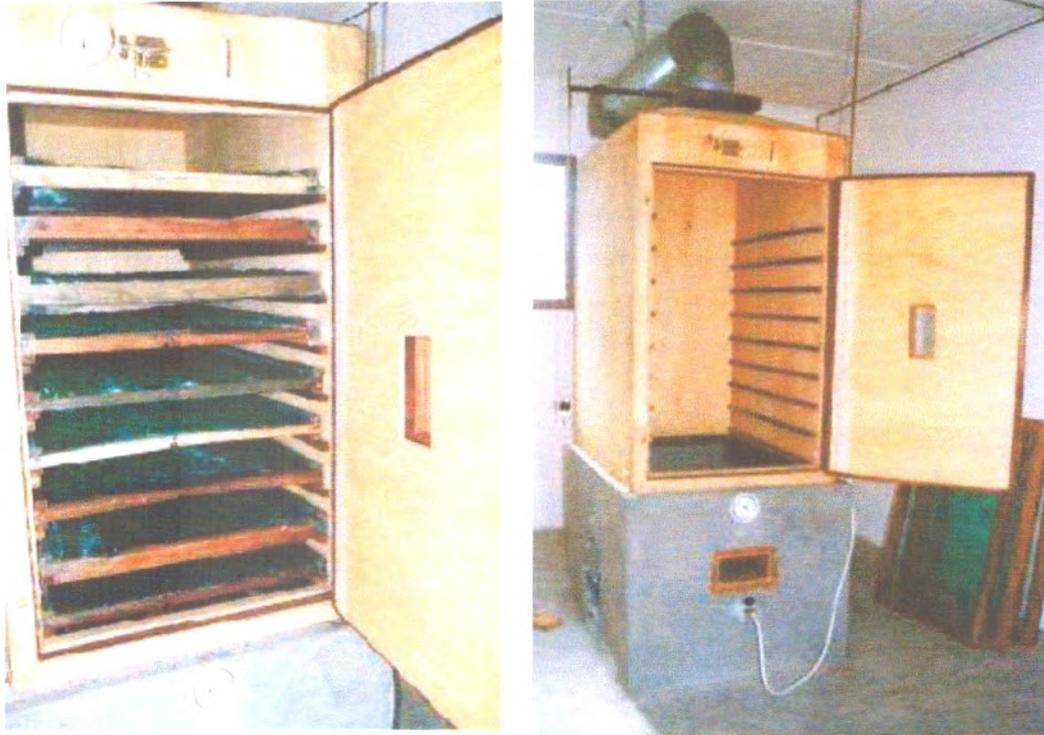
Avec un bon ensoleillement et un air sec, le séchage solaire est la solution la plus rapide et la moins coûteuse pour des faibles productions. Ce mode de séchage nécessite cependant que la spiruline soit protégée par une moustiquaire et qu'elle ne soit pas exposée directement aux rayons du soleil : un soleil intense et direct provoque une destruction de la chlorophylle par les rayons UV, ainsi qu'une altération sensible de son goût et de ses qualités nutritives.

(Darcas C, 2000)

Toutefois, le climat chaud et humide de certaines régions d'Afrique (Bénin par exemple) ne permet pas un chauffage solaire. Il faut donc d'autres techniques de séchage : par exemple, le séchage dans une armoire métallique munie d'un déshumidificateur et d'un ventilateur recyclant l'air à travers plusieurs plateaux (figures 09 a et 09 b).

(Doumenge F et al, 1993)





Figures 09a et 09b : Armoire de séchage (au Bénin) chauffée au gaz permettant l'installation de neuf plateaux de spiruline essorée. TECHNAP/CREDESA 2001.

En pratique, le temps de séchage ne doit pas dépasser 6 à 8 heures. La température maximale pour conserver toutes les qualités nutritives de la spiruline est fixée à 65°C. Le produit final doit être d'une jolie couleur verte, craquant, facile à détacher du support de séchage et facile à transformer en poudre. (Cruchot H, 2008)

8.2.9 Broyage :

Une fois sèche, la spiruline peut être broyée à l'aide d'un moulin à café, de façon à obtenir une poudre plus ou moins fine selon le goût de chacun. (Jourdan J.P, 2007)

8.2.10 Conditionnement et conservation :

Même si les cultures de spiruline survivent à des températures inférieures à 10°C, voire à de brèves gelées, il est prudent de ne pas les stocker en dessous de 18°C pendant de longues périodes, car les risques de contamination augmentent. (Hills C, 1980)

En ce qui concerne la biomasse non lavée et pressée jusqu'à une teneur en matière sèche comprise entre 20 et 30 %, la durée de conservation ne dépasse pas quelques heures à

température ambiante. Réfrigérée à 4°C, cette biomasse peut-être conservée deux à trois jours cette durée peut atteindre une bonne semaine si on ajoute 5 à 10 % de sel. Le mélange de biomasse de spiruline avec une huile alimentaire ainsi que certains condiments (herbes aromatiques) permettent également de prolonger le temps de conservation. **(Muet B, 1992)**

La congélation de la biomasse de spiruline est possible mais elle doit s'effectuer aussi rapidement que possible (couches minces ou installations spéciales), sans quoi la taille des cristaux de glace produits risque d'endommager ses filaments. Dans ces conditions, lors de la décongélation, il se produirait une exsudation massive du contenu cellulaire ; le produit obtenu serait peu engageant car de texture semi-gélifiée et de couleur bleue très foncée. Le séchage reste de loin le processus de conservation le plus utilisé pour la spiruline.

En cas de forte exposition à la lumière, la chlorophylle est assez vite détruite par des réactions photochimiques ; la couleur bleue de la phycocyanine apparaît alors comme dominante. **(Langlade M.J, 2006)**

La sensibilité de la spiruline séchée vis-à-vis de l'oxygène a été étudiée par plusieurs scientifiques. En 1997, A. Belay a publié les résultats de ses essais concernant les effets de l'oxygène sur de la poudre de spiruline séchée: après un stockage de cinq mois, à 25°C, dans de simples sachets en polyéthylène, 50 % du β -carotène de la spiruline était détruit ; parallèlement, la même spiruline conditionnée dans des sachets étanches à l'oxygène, avait conservé 98 % de son β -carotène. **(Clément G, 1975)**

L'action combinée de la lumière et de l'oxygène est donc des plus dommageables : par conséquent, seul un conditionnement opaque et sous vide (ou sous gaz inerte) peut garantir la conservation longue durée de la spiruline **(Muet B, 1992)**. Les sachets aluminisés multicouches thermo-scellables sont donc fortement recommandés.

Une spiruline de bonne qualité, emballée sous vide dans ces sachets, et conservée à une température inférieure à 30°C se conserve pendant cinq ans. **(Clément G, 1975)**

8.3 Culture industrielle :

La production industrielle est principalement commercialisée en tant que complément alimentaire "de confort" dans les pays de l'hémisphère Nord (pays riches).

Ensuite, les technologies utilisées pour la culture industrielle sont issues de la recherche scientifique, dans le but de maximiser les rendements de production.

En pratique, les bassins de culture industrielle ne sont pas beaucoup plus larges que les bassins artisanaux, mais ils sont très allongés **(Muet B, 1992)**

Une autre différence existe sur le plan des mesures d'hygiène entourant la culture de spiruline. Comme pour chaque produit de l'industrie alimentaire destiné à la consommation humaine, les normes en matière d'hygiène sont draconiennes. **(Merceron M, 2006)**

9/ Consommation de spiruline :

L'acceptabilité alimentaire de la spiruline a longtemps constitué un contre argument systématique à son introduction dans les programmes nutritionnels. L'intensité de sa couleur verte et son grand pouvoir colorant sur les autres aliments l'empêche d'être dissimulée au sein d'une préparation culinaire. A côté de la couleur, les objections portent aussi sur le goût et l'odeur. **(Clément G, 1975)**

Heureusement, son utilisation comme complément alimentaire dans la lutte contre la malnutrition pose moins de problèmes à ce niveau. Cela s'explique notamment par le fait qu'on retrouve, avec d'autres ingrédients des cuisines asiatiques et africaines, des odeurs comparables à celle de la spiruline séchée. Après un premier effet de surprise, les enfants en bas âge malnutris l'acceptent finalement très facilement. **(Doumenge F et al, 1993)**

La spiruline ne remplace pas les aliments caloriques tels que le manioc, le riz, le blé, la pomme de terre ou le maïs, mais c'est un ingrédient idéal de la sauce protéinée qui accompagne la "boule" africaine ; elle permet ainsi d'apporter non seulement ses protéines, mais les nombreux autres éléments très favorables à la bonne santé de tous et notamment des jeunes enfants. **(Merceron M, 2006)**

Depuis quelques années, diverses formulations de farines de sevrage contenant de la spiruline sont apparues dans plusieurs pays. **(Langlade M.J, 2006)**

10/ Le marché de la Spiruline :

Il est très difficile d'obtenir des renseignements permettant de connaître la production mondiale actuelle et les coûts de la Spiruline. Les chiffres donnés dans ce paragraphe ne le sont qu'à titre indicatif. Ils viennent pour la plupart d'une étude réalisée en 2000 par le bureau d'étude *Tractebel Consult* en association avec le Centre Universitaire de Biotechnologie Algale (CUBIA) en Belgique. **(Langlade et al, 2008).**

Offre

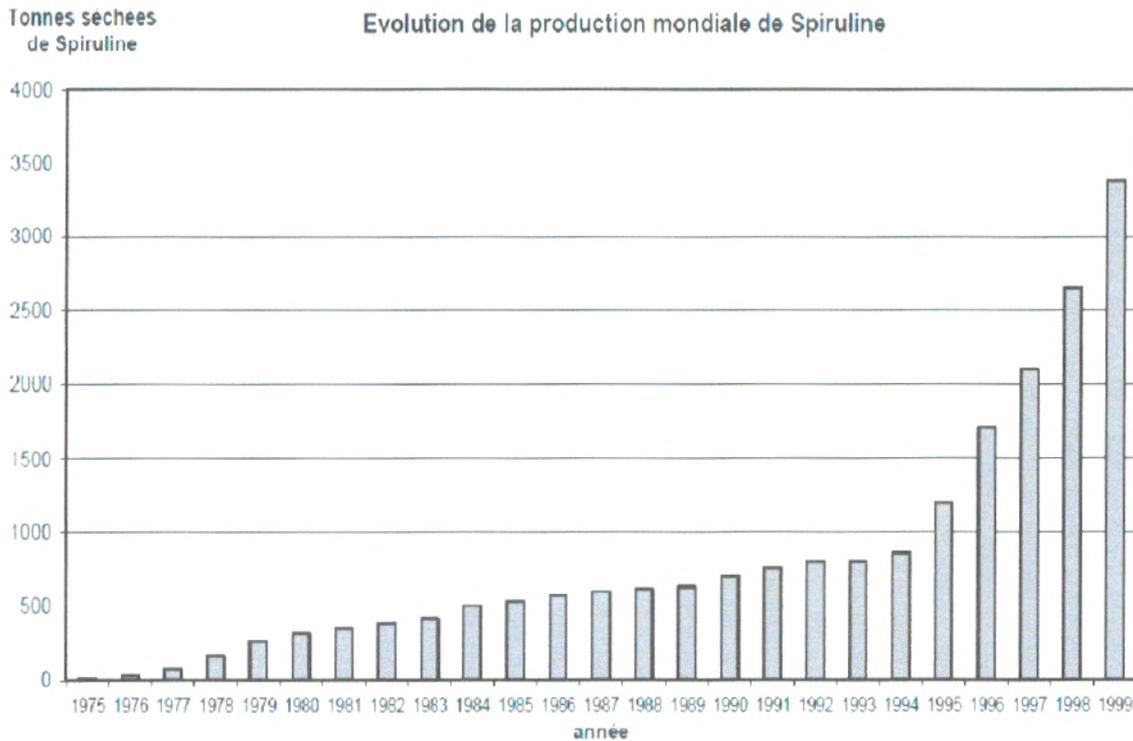


Figure 10 : Evolution de la production mondiale de Spiruline (CUBIA, 2000)

La production mondiale a régulièrement augmenté surtout depuis 1995. De 1400T en 1995, 3500T en 2000, elle est supérieure à 4000T aujourd’hui.

Dans les pays développés, la Spiruline issue de la production industrielle est vendue au prix de gros sous forme de poudre de 16€ à 19€ le kg en qualité humaine et de 8€ à 13€ le kg en qualité animale. Elle apparaît sur le marché sous forme de comprimés à 200€ le kg et sous forme de gélules à 500€ le kg. La Spiruline issue des productions artisanales en France, est vendue de 75€ le kg (prix de gros) à 130€ le kg (prix au détail). En Afrique, les prix de vente sont bien inférieurs : généralement de 25€ à 40€ le kg (rarement à plus de 40€ le kg), très variable selon le prix de revient, mais relativement bon marché (Langlade *et al*, 2008).

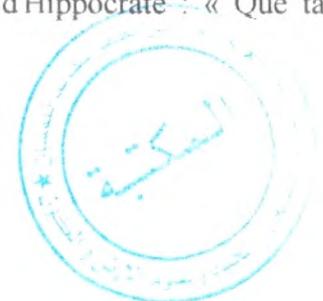
Depuis la nuit des temps, il existait sur Terre une source nutritionnelle et thérapeutique naturelle sans égale. Richesse protéique, acides aminés essentiels, acides gras essentiels, complexes vitaminiques multiples, fer biodisponible, activités antioxydantes, anti-inflammatoires, anticancéreuses, antivirales, immunomodulatrices, tout ceci condensé dans une simple algue bleue microscopique nommée *Spirulina platensis*.

Plus connue sous le nom de spiruline, cette cyanobactérie est aujourd'hui reconnue et utilisée dans les pays en voie de développement pour ses propriétés nutritionnelles pour lutter contre la malnutrition. Il est prouvé qu'une consommation régulière de spiruline permet à des enfants dénutris de suppléer aux besoins nutritionnels essentiels qu'une alimentation peu diversifiée ne peut leur apporter. C'est aussi dans le but de lutter contre la malnutrition chez les populations pauvres pour permettre un développement local et une gestion autonome de la culture de spiruline.

Dans les pays développés, même si la spiruline n'a suscité l'intérêt des scientifiques que tardivement, elle jouit aujourd'hui d'un intérêt grandissant grâce à ses multiples propriétés thérapeutiques. Ces effets bien qu'étant plus préventifs que curatifs, en font un complément alimentaire de choix pour prévenir la survenue de maladies tels que les maladies cardiovasculaires, les cancers ou les infections virales, mais aussi pour diminuer les effets secondaires de traitements médicamenteux lourds tels que le sont les traitements anticancéreux ou antirétroviraux. Pour une fois, le terme d'aliment fonctionnel pourrait être employé à juste titre, tant le nombre et la qualité des études scientifiques portant sur la spiruline attestent de sa réelle valeur nutritionnelle et de certains effets thérapeutiques.

Au vu de toutes ces propriétés, les professionnels de l'industrie cosmétique, pharmaceutique ou agro-alimentaire, ont pris conscience de l'énorme potentiel commerciale de l'algue bleue. Pour le moment, les produits à base de spiruline sont encore peu nombreux, mais à l'heure actuelle où fleurit le concept de la nutrition-santé, il est certain que le marché des microalgues alimentaires, avec comme chefs de files *Spirulina platensis*, est à l'aube d'une croissance mondiale importante. Dans les années à venir, nos assiettes risquent fortement d'être remplies de micro-algues alimentaires sous une forme ou sous une autre.

Spirulina platensis apparaît comme l'aliment santé de demain. Au vu de tous ces éléments, l'algue bleue semble donner tout son sens au célèbre aphorisme d'Hippocrate : « Que ta nourriture soit ton médicament »



chap II :
Matériels et
méthodes

1/ Choix et intérêt du microorganisme :

La spiruline est un produit naturel exceptionnel, ayant de multiples utilités Agro-alimentaire, pharmaceutique, écologique et biotechnologique. Les effets de sa consommation sur la santé humaine et animale ont été déjà démontrés mais c'est plutôt un complément alimentaire qu'un aliment de base. (Razafindrajaona *et al*, 2008)

2/ Échantillonnage :

Les échantillons de spiruline sèche sous forme de granulés nous ont été fournis par le médecin biologiste Dr Bouziane Rachid à Mostaganem où se trouve la culture en bassin du Dr Khattab. Les échantillons recueillis sont amenés au laboratoire et constituent notre matériel de départ pour l'analyse. Le contenu brut en protéines et en fer ont été ainsi déterminés.

3/Dosage des protéines totales :

Il est réalisé par la méthode de **Kjeldahl (1883)** s'effectuant en trois étapes : digestion (minéralisation), distillation et titration.

3.1/ Principe :

La méthode consiste à minéraliser l'échantillon à l'aide de l'acide sulfurique concentré et d'un catalyseur minéral à chaud, ce qui fait passer quantitativement l'azote organique à l'état de sulfate d'ammonium, ce dernier sera converti en ammoniac par distillation.

Un titrage par la soude de concentration connue permet de déduire la quantité d'ammoniac formée, donc la teneur en azote du produit initial.

3.2/ Mode opératoire :

3.2.1/ Minéralisation :

Dans un matras de Kjeldhal, on introduit :

- 1g de catalyseur à partir d'un mélange de 15g de sulfate de potassium anhydre K_2SO_4 et 1,2g de sulfate de cuivre $CuSO_4$;
- 12 ml d'acide sulfurique H_2SO_4 concentré ;
- 1g de matériel biologique broyé ;
- 2 ml de H_2O_2 .

On agite et on place le matras sur le dispositif de chauffage (**Photo 4**). L'ensemble est chauffé doucement et progressivement jusqu'à ce que la couleur noire disparaisse pour laisser place à une couleur transparente. Par cette opération l'ensemble de l'azote organique est transformé en azote minéral sous forme d'ammoniaque.

Le minéralisât (le contenu du matras) est transvasé dans une fiole tout en complétant le volume avec de l'eau distillée jusqu'à 100 ml, mélanger soigneusement afin de solubiliser en maximum les sulfates d'ammonium. Laisser refroidir.

3.2.2/ Distillation :

Elle se fait dans une unité de distillation **BÜCHI (Distillation Unit B- 324) (Photo 01)**

- ✓ 10 ml du contenu de la fiole sont introduites dans le matras de l'unité de distillation aux quels sont ajoutés 50 ml d'eau distillée et 50 ml de la soude caustique (NaOH) à 35% ;
- ✓ Chauffer pendant 6 minutes de façon à recueillir 150 ml de distillat au minimum ;

Le distillat est ensuite recueilli dans un erlenmeyer gradué contenant 25ml de solution d'acide sulfurique à 0,1N additionné de 10 gouttes d'indicateur de Tashiro (**annexe C : Préparation de réactif de Tashiro**

- ✓ 10 ml de méthyl rouge à 0.03% dans l'éthanol à 70% ;
- ✓ 1.5 ml de bleu de méthylène aqueux à 0.1%. qui est de couleur rose-violette en présence d'un milieu acide et vert dans le cas d'un milieu alcalin.



Photo 01 : Minéralisateur.

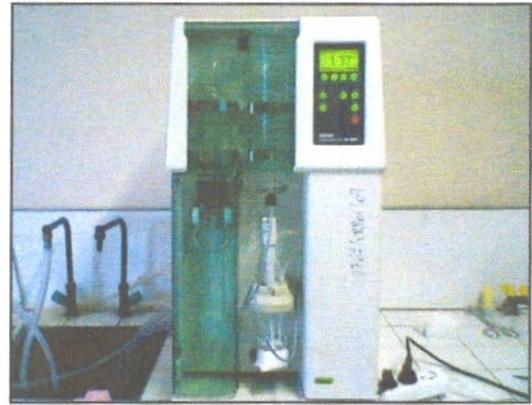


Photo 02: Distillateur

3.2.3/ Titration :

Puisqu'on utilise l'acide borique comme liquide de récupération. On va alors titrer l'excès d'acide sulfurique avec la solution de HCl 0,1N jusqu'à changement de la coloration du violet au vert.

3.3/ Expression des résultats :

3.3.1/ Azote total :

Le pourcentage d'azote total (N%) est calculé par la formule suivante :

$$N\% = \frac{(V_e - V_b) \times 0.014 \times f \times 0.2}{m} \times 100$$

Avec :

V_b : Volume en ml de la solution de HCl 0,2 N nécessaire pour neutraliser l'excès d'acide sulfurique présent dans l'essai à blanc ;

V_e : Volume en ml de la solution de HCl 0,2 N nécessaire pour neutraliser l'excès d'acide sulfurique présent dans l'échantillon à analyser ;

0.014 : masse atomique de l'azote (mg/mole).

0.2 : normalité de HCl utilisée pour la titration ;

m : masse en g de la prise d'essai (0,5g);

100 : coefficient du pourcentage.

F : facteur de correction. (0,8).

3.3.2/ Conversion du taux d'azote en taux de protéines :

100 g de protéines correspond à 16g d'azote dans la majorité des cas. On utilise un facteur de conversion basé sur le taux moyen d'azote des protéines :

$$F = 100/16 = 6,25$$

Donc, le taux des protéines brutes (**PB%**) est exprimé par :

$$PB\% = N\% * 6,25$$

4/ Dosage du fer :

4.1/ Matériels utilisés :

- **Four à moufle**
- Balance
- Bécher de 250 ml
- Fiole de 100 ml
- Papier filtre ;
- Spectrophotomètre d'Absorption Atomique (SAA)



Photo 03 : Spectrophotomètre
d'Absorption Atomique



Photo 04 : Four à moufle



Photo 05 : Balance de précision

4.2/ Préparation de l'échantillon :

- ❖ Incinération d'une prise d'essai de l'échantillon dont leur poids se comprend entre 1 et 2g dans un four à moufle à 60°C pendant 2 heures.
- ❖ Dissolution des cendres obtenues dans 10 ml de l'acide chlorhydrique concentré (12N) puis on filtre sur un papier filtre dans un fiole de 100 ml et on complète jusqu'à la trace de jauge avec de l'eau distillée ;
- ❖ On fait passer la solution obtenue pour la lecture à l'aide d'un spectrophotomètre d'absorption atomique à flamme Air- acétylène ;
- ❖ La concentration de la solution en fer est déterminée par la courbe d'étalonnage de fer après extrapolation de l'absorbance trouvée ; $A = f(C)$ [Loi de Beer-Lambert]

chap III :
Résultats et
discussion

1/Les protéines :

Tableau 03 : Résultat du dosage de protéines.

	échantillons		
	01	02	03
Teneur en protéine (g/100g)	75.64	72.84	78.4
Moyenne	75.62 ± 2.78		

Notre résultat bien présenté dans le tableau montre que la spiruline est caractérisée par un très fort taux de protéines pouvant atteindre jusqu'à 70 % du poids sec de l'algue. C'est l'aliment le plus riche en protéines connu à ce jour puisqu'elle en contient deux fois plus que le soja et trois fois plus que la viande ou le poisson., la teneur en protéines trouvée dans notre étude est supérieure à celle trouvée par **Clement 1975** et **Fox 1999** avec **75.62%** et **60%** respectivement, alors qu'elle reste dans l'intervalle déterminé par **Belay 1997**, qui prouve que la teneur en protéines de la spiruline peut aller de **60%** à **74%**, ces résultats sont à peut près élargis par **CRUCHOT 2008**, dit que la spiruline présente **50%** à **70 %** de son poids sec

cette variabilité des résultats est en fonction du moment de la récolte de la spiruline, la souche, le milieu de culture et de la technique de séchage.

2/ Le fer :

Tableau 04 : Résultat du dosage de fer.

	échantillons		
	01	02	03
Teneur en fer Mg/100g	66	68	64
Moyenne	66 ± 2		

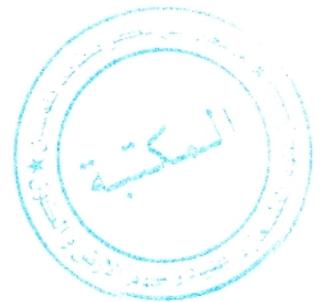
La richesse de la spiruline en fer dont la biodisponibilité est deux à trois fois supérieure à celle de la viande, se révèle très intéressante pour améliorer les anémies ferriprives liées aux malnutritions protéino-énergétiques surtout chez les femmes et les enfants et que les bonnes sources alimentaires de fer sont rares. la teneur en fer trouvée dans le présent travail reste dans l'intervalle déterminé par **Campanella et al. 1999** ou la teneur du fer varie entre 50 – 100 mg/100g de matière sèche de spiruline se qui est confirmé aussi par la teneur trouvée par **Bemiarana V,2008 ; 58 mg.**

Les Spirulines naturelles ont t des teneurs en fer dépassant 50 mg/100g bien que des valeurs supérieures à 100 mg/100g aient été trouvées (**Campanella et al. 1999**). La Spiruline de culture peut être enrichie en Fer et les teneurs obtenues peuvent être alors plus de 10 fois supérieures ;

La très haute teneur en fer de la spiruline cultivée (550-6000 mg/kg) est à souligner doublement, par comparaison les céréales complètes, classées parmi les meilleures sources de fer, n'en contiennent que 150 à 250 mg/kg (**Puyfoulhoux, 2001**). Naturellement, la spiruline contient du fer mais l'ajout de sels de fer dans son milieu de culture augmente sa teneur qui peut alors doubler.

Conclusion

Références bibliographiques



- Antenna Technologies, 2007. Malnutrition. Spiruline : quelques bases scientifiques. Disponible sur : <http://www.antenna.ch/documents/biologie.pdf>
- Belay A; Mass culture of *Spirulina* outdoor – The earthrise farms experiences. In Vonshak, A, 1997.*Spirulina platensis*, Physiology, Cell-biology and Biotechnology. Taylor & Francis, New York. P 131, 158.
- Belay A, Ota Y. 1994. Production of high quality spirulina at Earthrise Farms Proc Of Second Asia Pacific Conférence on Algal Biotech. Univ. of Malaysia. USA.
- Belay A, Toshimitsu K, Yoshimichi O. *Spirulina* (Arthrospira).1996. Potential application as an animal feed supplement. Ed. Dainippon Ink & Chemicals,Tokyo Japan. Journal of applied Phycology. P8,11.
- Bemiarana V, Nardo v, Riva A. 2008. colloque international sur la spirulinetoliara sud-ouest de madagascar, spiruline et developpement .
- Boudène C, Collas E, Jenkins C. 1975. Recherche et dosage de divers toxiques minéraux dans les algues spirulines de différentes origines, et évaluation de la toxicité à long terme chez le rat d'un lot d'algues spirulines de provenance mexicaine. Ann.Nutr.Aliment. P29, 87.
- Busson F. (1971) *Spirulina platensis* (Gom.) Geitler et *Spirulina geitleri* J. de Toni Cyanophycées alimentaires. Service de Santé, Parc du Pharo, Marseille. P162.
- Chamorro-Cevallos G. 1980.Toxicologic Research on the Alga *Spirulina*. United Nations Organisation for Industrial Development.
- Campanella L, Crescentini G, Avino P. 1999. Chemical composition and nutritional evaluation of some natural and commercial food products based on *Spirulina*. Analisis
- Clément G. 1975. *Spirulina*, a protein-rich food alga, conférence du Caire avril. Institut français du Pétrole, division Applications. P 1,18.
- CRUCHOT Hélène. 2008.la spiruline bilan et perspectives ; facute de medecine et de pharmacie de besancon .P 5, 9,18, 23,69, 180,183.
- Darcas C. 2000. La spiruline, une algue pour la santé- Livret guide de production. Bassins. cTechnap/Credesa. Disponible sur : <http://credesa.online.fr/fich2.htm#2-Bassin>
- Delpeuch F. 1976. Consumption as food and nutritional composition of blue-green algae among populations in the Kanem region of Chad. Ann.Nutr.Aliment.P29, 45.
- Doumenge F, Durand-Chastel H, Toulemont A. 1993. Spiruline, algue de vie/ *Spirulina*, algae of life.Bulletin de l'Institut Océanographique de Monaco. Monaco: Musée Océanographique.P 36 , 37.

- Farrar W. 1966. Tecuitlatl, a glimps of Aztec food technology. *Nature* (London). P341- 342.
- Fox RD.1999. La Spiruline: Technique, Pratique et Promesse. EDISUD, Aix en Provence P12, 80, 81.
- Fox D. 1999. Spiruline : technique pratique et promesse. Aix en Provence : Edisud. P 13, 44, 67, 101.
- Jourdan J.P. 2007. Manuel de culture de la Spiruline. Antenna Technologies.Disponible sur : <http://www.antenna.ch/documents/manuelJourdan2061.pdf>
- Henrikson R. 2000. Earth Food Spirulina. Laguna Beach, Californie : Ronore Enterprises. Disponible sur : <http://www.spirulinasource.com/earthfoodch5c.html>
- Hills C. 1980.The secrets of Spirulina, médical discoveries of Japanese Doctors. University of the three press. Boulder Creek, Californy : University of the three press.
- Kihlberg R.1972. The microbe as a source of food. *Annu. Rev. Microbiol* P427, 466.
- König C.2007.Les algues : première lignée végétale. Disponible sur : http://www.futura-sciences.com/fr/comprendre/dossiers/doc/t/botanique/d/lesalgues-premiere-ligee-vegetale_523/c3/221/p2/
- Langlade, M.J ; Alliod,R; Charpy, L . 2008. Utilisations de la spiruline autres que pour la malnutrition. Colloque international sur la spiruline. Toliara Sud Ouest de Madagascar. Conférence introductive
- Lee J-B, Hayashit T, Hayashi K, Sankawa U. 2000.Stuctural Analysis of Calcium Spirulan (Ca-SP)-Derivied Oligosaccharides Using Electrospray Ionization Mass Spectrométry. *J.Nat.Pord*; P, 38, 136.
- Leonard J.1966. the 1964-65 Belgian trans- saharian expedition. *Nature* 209 : 126-128
- Li J. H.2004. Recherche sur les applications et fonctions cliniques de la Spiruline en Chine. In : Colloque international : CSSD "Les Cyanobactéries pour la Santé, la Science et le Développement". Iles des Embiez (France)
- Manen JF, Falquet J. 2002.The cpcB--cpcA locus as a tool for the genetic characterization of the genus *Arthrospira* (Cyanobacteria): evidence for horizontal transfer. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*. P 7, 52.
- Mitchell GV, Grundel E, Jenkins M, Blakely SR. 1990.Effect of graded dietary levels of *Spirulina maxima* on vitamins A and E in male rats.*J.Nutr*; P40.
- Muet B. 1992.La spiruline : petite "spirale de l'espoir". Bulletin du Fonds Mondial de Solidarité Contre la Faim, juin. Disponible sur :

<http://www.globidar.org/solidareco/fr373.htm>

- Puyfoulhoux G, Rouanet JM, Besançon P, Baroux B, Baccou JC, Caporiccio B. 2001. Iron availability from iron-fortified spirulina by an in vitro digestion/Caco-2 cell culture model J Agric Food Chem. P9, 49.
- Qishen P. 1988. Enhancement of endonuclease activity and repair DNA synthesis by polysaccharide of spirulina. Chinese Genetics Journal. P, 165, 171.
- Rao D. L. R., Vankataraman G. S., Duggal S. K. 1981. Amino acid composition and protein efficiency ratio (PER) of *Spirulina platensis*. Proc. Indian Acad. Sci. (Plant Sci.), P 451,456.
- Razafindrajaona J. M. Rakotozandriny J ; Rakotozandrindrainy R ; Tsivingaina .A ; Dramapiherika K .D ; Randria J. N. 2008. Influence de l'incorporation dans les provendes de la spiruline de Madagascar (*spirulina platensis var. toliara*) sur la croissance des poulets de chair. Colloque international sur la Spiruline.
- Roger P.A ; Les cyanobactéries. 2006. Disponible sur : <http://pagesperso-orange.fr/cyanobacteries/pages/Introduction/definition.htm>
- Scheldeman P, Baurain D, Bouhy R, Scott M, Belay A, Wilmotte A. et al. Arthrospira (Spirulina) strains from four continents are resolved into only two clusters, based on amplified ribosomal DNA restriction analysis of the internally transcribed spacer
- Sorto M. Voies alimentaires d'amélioration des situations nutritionnelles : utilisation et consommation de la spiruline au Tchad. 2ème Atelier international ; Ouagadougou, 23-28 /11/ 2003. Disponible sur : http://spirulinagadez.free.fr/pdfs/Tchad_Sorto.pdf
- Vicente N. 2008 . Spiruline et développement. Colloque international sur la spiruline. Toliara Sud Ouest de Madagascar.
- Vonshak A., Abeliovich A., Boussiba S., Arad S., A. R. 1982. Production of Spirulina biomass: effect of environmental factors and population density. Biomass. Applied Science Publishers Ltd, England 2. P175, 185.



Résumé

La spiruline, C'est un petit être aquatique, vieux comme le monde dont le nom scientifique est "cyanobactérie *Arthrospira platensis*", qui vit de photosynthèse comme les plantes et prospère naturellement dans les lacs salés et alcalins des régions chaudes du globe.

Elle offre une source de complément alimentaire ou nutritionnel pour les couches défavorisées de différente population du monde

La très grande richesse de la composition chimique de la Spiruline lui confère un large potentiel d'utilisations. Outre dans le domaine de la malnutrition, elle est utilisée dans des domaines variés grâce à ces apports en mico-nutriments. Cette étude a permis de démystifier la spiruline et de mettre au point des techniques pour étudier cette algue, évaluer ses valeurs nutritionnelles et sa toxicité et de domestiquer la culture de la spiruline et l'exploiter à l'échelle industrielle.

Abstract

Spirulina is a small aquatic being, old-world whose scientific name is "cyanobacterium *Arthrospira platensis*", who lives photosynthesis like plants and thrives naturally in salt lakes and alkaline hot regions of the globe. It provides a source of nutrition or dietary supplement for the underprivileged population of different world.

The richness of the chemical composition of Spirulina gives a wide potential uses. Also in the area of malnutrition, it is used in various fields thanks to these contributions in mico-nutriments. This study demystify spirulina and develop techniques to study the algae, evaluate its nutritional value and toxicity and to domesticate the cultivation of Spirulina and operate on an industrial scale.

المخلص

السبيرولينا كائن السبيرولينا كائن cyanobacterie *Arthrospira platensis* ، يعتمد على عملية التركيب الضوئي مثل النباتات، يعيش في المياه والبحيرات المالحة من المناطق الساخنة من العالم. يمكن للسبيرولينا أن تكون مصدرا غذائيا أو مكملًا غذائيا للسكان المحرومين من مختلف العالم.

ثراء التكوين الكيميائي الجذ المتنوع للسبيرولينا يعطيه استخدام واسع في عدة مجالات منها مجال سوء التغذية، نتطرق في هذه الدراسة إلى إزالة الغموض عن سبيرولينا وإظهار قيمتها الغذائية بوضع و تطوير تقنيات لدراسة الطحالب ، وكذلك سبل زراعة سبيرولينا على النطاق الصناعي.

