

*République Algérienne Démocratique et Populaire*  
*Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique*  
Université Abderrahmane MIRA-Bejaia

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie  
Département de Sciences Biologiques de l'Environnement  
Filière: Sciences Biologiques  
Option: Taxo-génétique Végétale et Evolution



Réf.....

Mémoire de Fin de Cycle  
En vue de l'obtention du diplôme

**MASTER**

*Thème*

Production de la Spiruline en Algérie  
(*Arthrospira platansis*) : Bilan et  
perspectives

Présenté par:  
**M. HOCINI M<sup>ed</sup> Abdelhadi**  
Juin 2017

Devant le jury composé de :

	<b>Grade</b>	
CHELLI. A	MAA	Président
ZEBBOUDJ. A	Pr	Encadreur
BOUALLAG. L	MAA	Examineur

**Année universitaire: 2016/2017**

# ***REMERCIEMENTS***

Je tiens à exprimer ma gratitude à Madame Aïcha ZEBBOUJ, pour avoir accepté de diriger ce mémoire tout en ayant l'obligeance de consacrer de son temps précieux pour donner des conseils très utiles qui m'ont permis d'enrichir et de mener à bien ce travail.

Mes remerciements vont également aux membres du jury, pour avoir accepté de juger mon travail.

Je remercie également mes parents, mes frères et sœur qui n'ont pas cessé de nourrir ma motivation pour ce travail et qui m'ont assistés par leurs encouragements.

Je remercie ma femme pour son aide et son soutien inconditionnel.

M. MERABET et M. AMRIOU sont également à remercier

Je remercie M. HIRI d'avoir accepté de nous envoyer une souche de spiruline sans aucune contrepartie.

Finalement, je remercie toutes celles et tous ceux qui m'ont aidé d'une manière ou d'une autre à la réalisation de ce travail.

## Sommaire

<i>Introduction générale</i> .....	1
<i>Partie 1 Etude Bibliographique</i> .....	2
<i>1. Présentation de la spiruline</i> .....	2
<i>1.1. Histoire des spirulines</i> .....	2
<i>1.2. Taxonomie de la Spiruline</i> .....	3
<i>1.3. Morphologie</i> .....	4
<i>1.4. Reproduction</i> .....	6
<i>1.5. Cycle biologique</i> .....	6
<i>1.6. Ecologie</i> .....	6
<i>2. Tolérance aux facteurs du milieu</i> .....	9
<i>2.1. Température</i> .....	9
<i>2.2. Lumière</i> .....	9
<i>2.3. pH</i> .....	9
<i>2.4. Salinité</i> .....	10
<i>3. Phylogénie moléculaire (Arthrospira et Spirulina)</i> .....	10
<i>4. Analyse nutritionnelle</i> .....	12
<i>4.1. Teneurs en éléments organiques</i> .....	12
<i>4.1.1. Protéines</i> .....	12
<i>4.1.2. Teneurs en acides aminés</i> .....	13
<i>4.1.3. Glucides</i> .....	14
<i>4.1.4. Teneurs en vitamines</i> .....	14
<i>4.1.5. Teneurs en lipides</i> .....	14
<i>4.2. Teneurs en Oligo-éléments</i> .....	15
<i>4.2.1. Teneurs en éléments majeurs</i> .....	16
<i>4.2.2. Teneurs en éléments toxiques</i> .....	16
<i>4.2.3. Teneurs en éléments traces</i> .....	17
<i>4.2.4. Teneurs en Terres Rares</i> .....	18
<i>5. Aspects toxicologiques</i> .....	18
<i>5.1. Toxiques minéraux</i> .....	18
<i>5.2. Toxiques organiques</i> .....	19

---

5.3. Cyanotoxines.....	19
5.4. Résidus de pesticides.....	20
5.5. Réactions allergiques.....	20
5.6. Risques de surdoses.....	20
6. Production de la spiruline.....	20
6.1. Cultures artisanales.....	20
6.1.1. Facteurs climatiques.....	21
6.1.2. Facteurs concernant les bassins de culture.....	21
6.1.3. Milieu de culture.....	21
6.1.4. Récolte.....	22
6.1.4.1. Filtration.....	22
6.1.4.2. Lavage et Essorage (pressage).....	22
6.1.4.3. Extrusion et Séchage.....	23
6.1.4.4. Broyage.....	25
6.1.4.5. Conditionnement.....	25
6.2. Cultures industrielles.....	25
6.3. Production mondiale et régionale.....	26
7. Bienfaits de la spiruline.....	27
7.1. Pour l'être humain.....	27
7.1.1. Bienfaits thérapeutiques.....	27
7.1.2. Bienfaits cosmétiques.....	28
7.2. Pour les animaux.....	28
8. Modes de consommation.....	29
8.1. Dans les pays en voie de développement.....	29
8.2. Dans les pays développés.....	29
Partie 2 Matériel et méthodes.....	30
1. Choix et intérêt du microorganisme.....	30
2. Souche.....	30
3. Intérêt du travail.....	30
4. Dispositif expérimental.....	30
4.1. Milieu de culture.....	31
4.2. Ensemencement.....	31

---

4.3. Conditions de culture .....	31
4.3.1. Agitation .....	32
4.3.2. Eclairage .....	32
5. Evolution du développement algal .....	32
5.1. Evolution des paramètres physico-chimiques.....	32
5.2. Etude de caractérisation de la spiruline .....	32
6. Récolte .....	33
Partie 3 Résultats et Discussion.....	34
1. Etudes de la culture .....	34
1.1. Evolution des paramètres physico-chimiques .....	34
1.1.1. Température .....	34
1.1.2. pH .....	35
1.2. Caractérisation de la spiruline .....	36
1.2.1. Etude morphologique et changement de couleur .....	36
1.3. Evolution des paramètres biométrique .....	37
1.3.1. Evolution de la biomasse.....	37
2. Etude de la croissance de Spirulina dans les cultures .....	38
2.1. Etude de la croissance de Spirulina du 1 <sup>er</sup> récipient.....	39
2.2. Etude de la croissance de Spirulina du 2 <sup>ème</sup> récipient.....	39
3. Récolte .....	40
Conclusion générale.....	41
Références Bibliographiques.....	42

Liste des Tableaux

**Tableau 1** : Taxonomie récapitulative (Fox, 1999).....4

**Tableau 2** : Résumé de plusieurs descriptions morphologique d'*Arthrospira platensis* (Antenna Technologie).....5

**Tableau 3** : Sites géographiques où se trouve naturellement le genre *Arthrospira* (Scheldeman, 1999).....8

**Tableau 4** : Composition moyenne globale de la spiruline (Jourdan, 2006).....12

**Tableau 5** : Comparative des taux de protéines de quelques aliments (Falquet, 1996) (Antanna Technologie).....13

**Tableau 6** : Teneurs en pourcentage des acides aminés dans les protéines totales (Antanna Technologie).....13

**Tableau 7** : Teneurs en vitamine (mg/kg) de matière sèche de la spiruline (Antanna Technologie).....14

**Tableau 8** : Teneurs en lipides (mg/kg) de matière sèche de la spiruline (Antanna Technologie).....15

**Tableau 9** : Teneurs en éléments majeurs (g/kg) des spirulines de France (SP14, SP15), Madagascar (SP19), Inde (SP21), Costa Rica (SP25) et Equateur (SP26) (Vicat et al. 2016)...16

**Tableau 10** : Teneurs en éléments toxiques (mg/kg) des spirulines de France (SP14, SP15), Madagascar (SP19), Inde (SP21), Costa Rica (SP25) et Equateur (SP26) (Vicat et al. 2016)...16

**Tableau 11** : Teneurs en éléments traces (mg/kg) des spirulines de France (SP14, SP15), Madagascar (SP19), Inde (SP21), Costa Rica (SP25) et Equateur (SP26) (Vicat et al. 2016)...17

**Tableau 12** : Teneurs en Terres Rares (mg/kg) des spirulines de France (SP14, SP15), Madagascar (SP19), Inde (SP21), Costa Rica (SP25) et Equateur (SP26) (Vicat et al. 2016)...18

**Tableau 13** : Les moyennes observées des éléments toxiques (Flaquet, 2006).....19

**Tableau 14** : Composition chimique du milieu de culture Hiri.....31

**Tableau 15** : Evolution de la température et du pH des cultures de *Spirulina*.....34

**Tableau 16** : Evolutions des densités optiques des cultures de *spiruline*.....37

**Tableau 17** : Abondance des filaments de *Spirulina* cultivée.....38

Liste des figures

<b>Figure 1</b> : Morphologies typiques de la Spiruline (Jarisoa, 2005).....	5
<b>Figure 2</b> : Cycle biologique de la Spiruline selon (Balloni et al. 1980 in Charpy, 2008).....	6
<b>Figure 3</b> : Zone de croissance naturelle de la Spiruline dans le monde (Fox, 1999).....	7
<b>Figure 4</b> : L'arbre phylogénétique de 51 protéines ribosomales concaténées de cyanobactéries (Cheevadhanarak et al. 2012).....	11
<b>Figure 5</b> : Production mondiale de Spiruline entre 1975 et 1999 en tons (1 tons = 1,016 tonnes) (Pulz et al. 2004).....	26
<b>Figure 6</b> : 2 récipients en verre.....	30
<b>Figure 7</b> : Agitation des 2 récipients.....	32
<b>Figure 8</b> : Filtration (a) et (a'), essorage (b), séchage (c).....	33
<b>Figure 9</b> : Evolution de la température dans les cultures de Spiruline.....	35
<b>Figure 10</b> : Evolution du pH dans les cultures de Spiruline.....	35
<b>Figure 11</b> : Filament en forme ondulée 1 <sup>er</sup> récipient observé au microscope optique grossissement 10.....	36
<b>Figure 12</b> : Filaments de forme droite et spiralée 1 <sup>er</sup> récipient observé au microscope optique grossissement 10(a) et grossissement 40 (b).....	36
<b>Figure 13</b> : Courbe des valeurs de l'absorbance de la spiruline.....	38
<b>Figure 14</b> : Abondance des filaments de <i>Spirulina</i> dans les deux bacs de culture.....	38
<b>Figure 15</b> : Enchevêtrement des filaments de <i>Spirulina</i> dans le 1 <sup>er</sup> récipient 10/05/2017 (a) et 23/05/2017 (b).....	39
<b>Figure 16</b> : Dépigmentation des trichomes de <i>Spirulina</i> dans le 2 <sup>eme</sup> récipient observé au microscope grossissement 40.....	40
<b>Figure 17</b> : Couleurs de la culture 1 <sup>er</sup> récipient (a), 2 <sup>eme</sup> récipient (b).....	40

### **Introduction générale :**

Les cyanobactéries, anciennement appelées algues bleues, sont des bactéries photosynthétiques qui produisent de l'oxygène. Elles présentent une très grande diversité morphologique, elles peuvent être unicellulaires ou filamenteuses, regroupées en colonies, ou sous forme isolée. Le genre *Arthrospira* renferme des cyanobactéries filamenteuses, dont fait partie une bactérie particulièrement intéressante *Arthrospira platensis* plus connue sous le nom de Spiruline. Riche en nutriments tels que protéines, glucides, lipides, vitamines et minéraux, elle est consommée depuis des siècles par certains peuples d'Afrique et d'Amérique.

Compte tenu de ses propriétés nutritionnelles, la spiruline est utilisée par certaines ONG pour lutter contre la malnutrition dans certains pays pauvre ou en voie de développement, mais aussi utiliser comme additif alimentaire ou alcaliment.

La Spiruline peut avoir des vertus thérapeutiques grâce notamment à l'un de ces principaux pigments, la phycocyanine, qui lui donne cette couleur bleu-vert, d'où l'intérêt grandissant de la part de la communauté scientifique internationale pour une possible utilisation comme source de produits à intérêt thérapeutiques. Certaines études ont mis en évidence des vertus thérapeutiques de la spiruline, on peut citer : des activités sur le système immunitaire, des effets dans la lutte contre le cancer et le sida mais aussi contre le vieillissement cellulaire, des propriétés hépatoprotectrices et des propriétés anti-inflammatoires (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*.

La partie bibliographique de notre travail décrit l'historique, la morphologie, la taxonomie, l'écologie, la composition nutritionnelle qualitative et quantitative, les différentes techniques de culture existant actuellement à travers le monde, les différents modes de consommation et les risques de toxicité d'*Arthrospira platensis*. S'en suivra, une synthèse des propriétés thérapeutiques de la spiruline et de ses principaux constituants, avant d'exposer brièvement les différents moyens de production de cette algue à travers le monde.

La partie pratique consiste à réaliser une culture de spiruline et de constater son évolution et sa productivité.

# ***Partie 1 Etude Bibliographique***

## ***1. Présentation de la spiruline***

La Spiruline est un micro-organisme appartenant au groupe des cyanobactéries (groupe comprend l'ensemble des bactéries autotrophes, c'est-à-dire capables d'utiliser l'énergie de la lumière pour la photosynthèse (Roger, 2006)). 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. Elle a été longtemps classée parmi les « algues bleu-vert », pour ces raisons :

- sa morphologie proche de celle des algues,
- sa couleur liée à sa teneur en pigments bleu (phycocyanine) et vert (chlorophylle).

### ***1.1. Histoire des spirulines***

Les Aztèques peuple originel du Mexique avaient de faibles ressources agraires, leur aliment principal étant le maïs, ce peuple a réussi de survivre pendant des siècles avant l'arrivée des colons espagnols. Farrar en 1966 s'est interrogé sur les moyens qui ont permis à cette population de survivre. Le poisson et les oiseaux du lac Texcoco fournissent un apport protéique pas assez suffisant pour combler leurs besoins. Il suggéra que la source complémentaire de protéines émanait d'une ressource qui provenait du lac, appelée Tecuitlatl (Paniagua-michel *et al.* 1993). De nombreux ouvrages de l'époque coloniale espagnole citaient déjà une certaine substance bleu-vert que les Aztèques utilisaient. Le tecuitlatl est une sorte de purée considérée par les colons comme minéral, une terre, un limon, consommée par les paysans après avoir été séchée et broyée. En réalité le tecuitlatl est un gâteau de spirulines, extrêmement riches en protéines, appartenant à l'espèce *Spirulina maxima* (Paniagua-michel *et al.* 1993). L'algue ne fut vraiment redécouverte que quelques 450 ans après par le botaniste belge Léonard lors d'une expédition belgo-française basée au Tchad (1964 - 1965), bien que déjà décrite par Wittrock et Nordstedt en 1844 (Fox. 1999). Léonard en 1968 a en effet constaté que les Kanembous (population d'Afrique centrale et occidentale vivant principalement à l'ouest du Tchad, dans la région du Kanem, sur la rive nord du lac Tchad) écumaient la surface des mares riches en carbonates de sodium, à la recherche de la fameuse algue abondante sur ce lac et la récoltée sous forme d'une purée bleu-vert. Cette purée était ensuite utilisée dans la préparation des galettes appelées « dihé » (Girardin et Andréani, 2005). Compère et Leonard en 1968 constatèrent, en étudiant des échantillons qu'avait ramené Léonard de son expédition, qu'en effet les galettes contenaient essentiellement l'algue bleue *Spirulina platensis*.

Peu après, l'Institut Français du pétrole rendirent compte de leurs travaux sur la spiruline. Ces chercheurs ont isolé des souches de spirulines, ils les ont purifiées, puis cultivées et en fin analysées. L'analyse a prouvé que les spirulines, qui en constituent la masse essentielle du « dihé », ont un contenu fabuleux : 50 à 60 % de protéines de bonne qualité alimentaire, 6 % de graisses et 15 à 20 % de sucres, ajouté à cela une multitude de vitamine et une série d'autres molécules rares, fort utiles à une nutrition saine et complète. La valeur alimentaire des spirulines a été clairement établie dès 1976. (Delpeuch *et al.* 1975 ; Sautier et Trémolières, 1976).

### **1.2. Taxonomie de la Spiruline :**

Apparue sur la terre il y a environ trois milliards et demi d'années les spirulines sont donc une des plus anciennes formes de vie «photosynthétique». La Spiruline est considérée souvent comme une algue planctonique microscopique. En réalité elle est une bactérie appartenant aux cyanobactéries filamenteuses du genre *Arthrospira*, le plus souvent enroulée en spires d'où son nom commercial (Girardin et Andréani, 2005). La terminologie de la Spiruline est assez confuse. La confusion entre les deux noms *Arthrospira* et *Spirulina* est due à la décision d'unifier les deux genres *Arthrospira stizenberger* et *Spirulina turpin* sur la base de leurs trichomes en spirale (Geitler, 1932). Néanmoins la "vraie" *Spirulina* n'est pas affiliée au genre *Arthrospira* (Nelissen, 1994). Les organismes du genre *Arthrospira* se trouvent communément dans des eaux saumâtres, ainsi que dans des lacs salins de régions tropicales et semi-tropicales (Castenholz. *et al.* 2001). 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* (Fox, 1999). *Spirulina subsalsa* se classe parmi les espèces de cyanobactéries potentiellement toxiques puisque une toxine à été révélée présente mais non identifiée (Levi *et al.* , 2006).

Les deux espèces les mieux connues sont *Arthrospira platensis*, originaire d'Afrique et *Arthrospira maxima* originaire d'Amérique centrale. L'espèce qui nous intéresse pour ce mémoire est l'espèce *Arthrospira platensis* (Nordst. Gomont, 1892) dont la classification est donnée dans le tableau suivant (*Tableau 1*) :

**Tableau 1** : Taxonomie récapitulative (Fox, 1999)

<b>Règne</b>	Monera ou Bacteria
<b>Sous-règne</b>	Prokaryota
<b>Phylum ou Division</b>	Cyanophyta ou Cyanobacteria
<b>Classe</b>	Cyanophyceae
<b>Ordre</b>	Oscillatoriales
<b>Famille</b>	Oscillatoriaceae
<b>Genre</b>	<i>Arthrospira</i>
<b>Espèce</b>	<i>Arthrospira platensis</i>

### **1.3. Morphologie**

La Spiruline a une longueur moyenne de 250 µm quand elle possède 7 spires. Elle est composée de filaments mobiles (de 10 à 12 µm de diamètre) non ramifiés et enroulés en spirales, généralement en 6 ou 7 spires, qui ressemble à un minuscule ressort à boudin, d'où le nom de «Spiruline» (Geitler, 1932 in Jarisoa, 2005). On trouve cependant des Spirulines ondulées et parfois droites.

Plus précisément, la Spiruline est constituée de cellules transparentes empilées bout à bout formant ainsi un filament ou trichome. L'enroulement du trichome sur lui-même s'effectue suivant le sens des aiguilles d'une montre lorsqu'on regarde au-dessus de la spirale. Les facteurs environnementaux tels que la température auraient cependant une influence sur l'orientation de l'hélice, (Muhling *et al.* 2003 in Jarisoa, 2005). Les filaments d'*Arthrospira* sont motiles, se déplaçant souvent par des mouvements en vrilles à plus de 5µ par seconde, sa motilité lui sert à se protéger des expositions trop fortes au soleil (Fox, 1999).

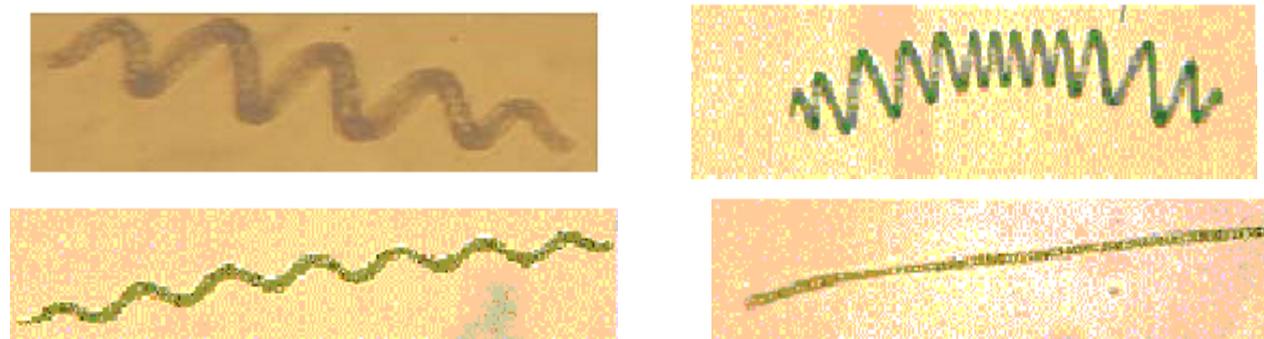
L'analyse des caractéristiques génétiques de l'espèce *Arthaospira platensis* effectuées par Scheldeman *et al* en 1999, basées sur l'ARDA (Amplified Ribosomal DNA Restriction Analysis) montre une grande plasticité morphologique (*Tableau 2*). Sachant que certaines souches initialement spiralées peuvent devenir ondulées ou droites (Cruchot, 2008), ceci est peut-être dû aux facteurs physicochimiques exogènes tels que la température, ou d'autres facteurs probablement liés aux changements génétiques (Belay, 2007). Les scientifiques étudiant la spiruline ont donc d'abord pensé qu'il existait de nombreuses espèces d'*Arthrospira* ; en fait, l'analyse de leurs caractéristiques génétiques, effectuées par Scheldeman *et al* en 1999, fait apparaître deux espèces presque identiques d'*Arthrospira*. Ils supposent alors que de ces deux espèces (*platensis* et *maxima*) dérivent plusieurs souches. La question du nombre de variétés de spiruline fait encore débat entre les scientifiques.

On distingue plusieurs morphologies "spiralées", "ondulées", et "droites" (*figure 01*) :

- les "spiralées", désigne les souches dont les filaments ont la forme d'une queue de cochon, telle la "Lonar" (variété présente en Inde),

- les "ondulées" désigne les souches dont les filaments sont en spirale étirée, telle la "Paracas" (variété présente au Pérou),

- les "droites" désigne les souches dont les filaments sont tellement étirés qu'ils donnent l'impression d'être presque rectilignes telle le la variété M2 (Jarisoia, 2005)



Forme ondulée (type « Paracas »)

Forme droite (type « M2 »)

**Figure 1** : Morphologies typiques de la Spiruline (Jarisoa, 2005).

**Tableau 2** : Résumé de plusieurs descriptions morphologique d'*Arthrospira platensis*  
(Antenna Technologie)

<i>Date</i>	<i>Lieu</i>	<i>Longueur des cellules <math>\mu</math></i>	<i>Diamètre des cellules <math>\mu</math></i>	<i>Diamètre des spires <math>\mu</math></i>	<i>Distance entre spires <math>\mu</math></i>
1844	Uruguay	2-6	6-8	26-36	43-57
1893	Uruguay	2-6	6-8	26-36	43-57
1931	Kenya	3-10	6-11	36-60	15-45
1959	Uruguay	2-6	6-8	26-36	43-57
1967	Tchad	5	6-9	25-45	35-50
1980	Pérou	2.5	7.8	36	95
1984	Inde	4.5	12	99	55
1990	Mexique	3.2	12.45	52.3	52
1993	Pérou	2.4	9.5	33	43
1994	France (Camargue)	2.3	11.6	44	109
1994	Madagascar	3.8	7.2	12.2	32.5
1994	Californie	2.6	6.1	32	65
<i>Moyennes</i>		<i>3.7</i>	<i>8.6</i>	<i>44</i>	<i>59.7</i>

### 1.4. 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, 2007). 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 régénération est très court (7 heures). (Zarrouk, 1966 in Jourdan, 2006)

### 1.5. Cycle biologique :

Le filament de Spiruline à maturité forme des cellules spéciales appelées Nécriides. Elles se différencient des autres cellules par leur aspect biconcave et sont assimilées à des disques de séparation. A partir de ces derniers, le trichome se fragmente pour donner de nouveaux filaments de 2 à 4 cellules appelés Hormogonies. Les Hormogonies vont croître en longueur par division binaire (chacune des cellules va donner deux cellules par scissiparité) et prendre la forme typique hélicoïdale (Balloni *et al.* 1980 in Charpy, 2008) (figure 2).

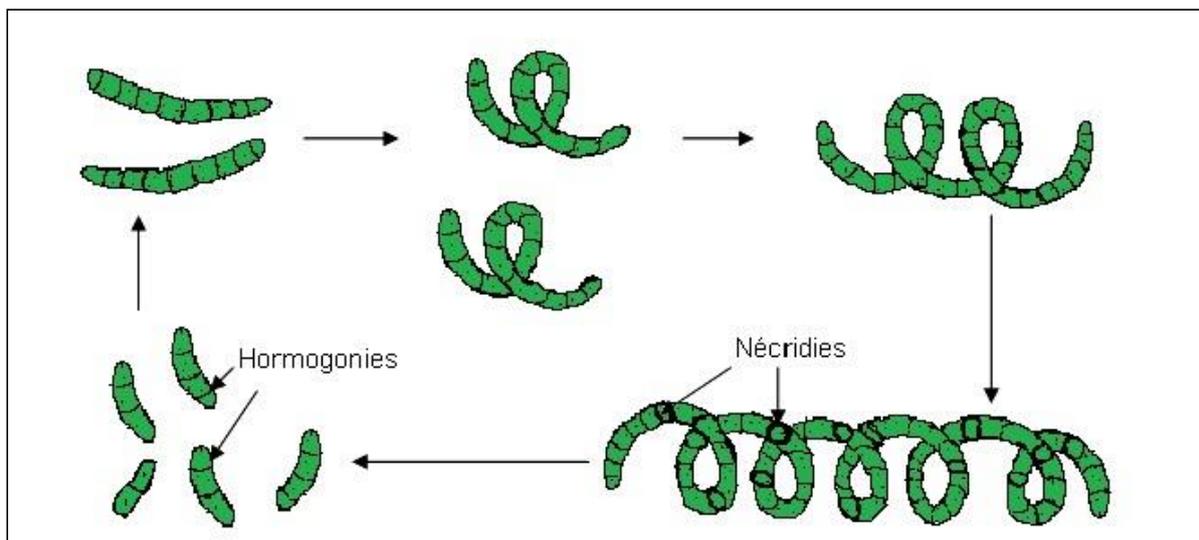


Figure 2 : Cycle biologique de la Spiruline selon (Balloni *et al.* 1980 in Charpy, 2008)

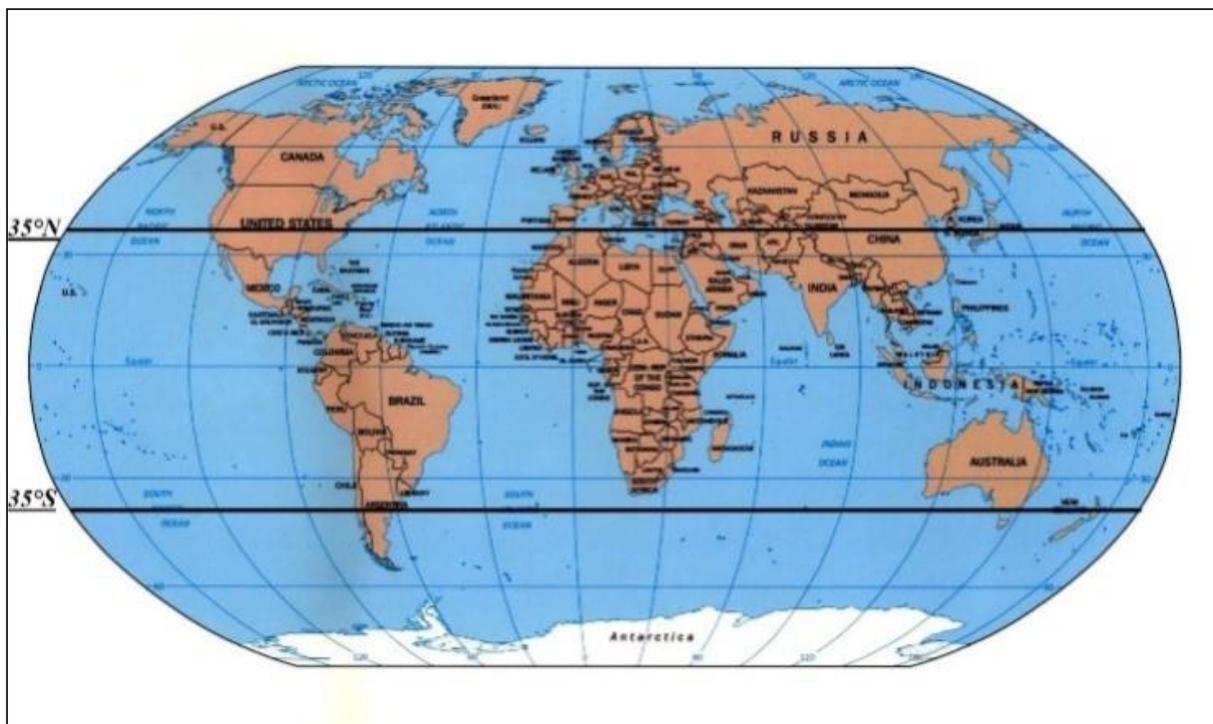
### 1.6. Ecologie

A l'état naturel, la spiruline est donc retrouvée dans des lacs de la ceinture intertropicale du globe terrestre, dont les eaux sont riches en carbonate de sodium ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), bicarbonate de sodium ( $\text{NaHCO}_3$ ), divers minéraux et une source d'azote fixé. Ces lacs sont situés approximativement entre 35° de latitude Nord et 35° de latitude Sud (Figure 3); ils sont peu profonds et agités par des vents légers.

Ce qui distingue le genre *Arthrospira* des autres cyanobactéries, c'est le milieu naturel où elles vivent (*Tableau 3*). 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 à renforcer l'effet d'exclusion, par trois phénomènes (Doumenge *et al.* 1993) (Scheldeman *et al.* 1999):

- La consommation des carbonates et bicarbonates du milieu tend à augmenter l'alcalinité de celui-ci
- Ses filaments pigmentés et flottants forment un écran qui prive les rares algues qui pourraient s'accommoder du milieu de culture de la lumière du soleil (exemple de la chlorelle, micro algue comestible pouvant proliférer dans des cultures de spirulines trop peu concentrées) ;
- La sécrétion de 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. Les flamants ont pour habitude de voler sur de longues distances pour rechercher de la nourriture, la spiruline accrocher aux écailles de leurs pattes et à leurs plumes, se trouve transportée dans d'autres lacs alcalins où elle a pu proliférer, donc notamment partout où vivent le flamant nain (Afrique et Asie) et le flamant de James, *Phoenicoparrus jamesi* (Amérique du sud). (Lee, 2000) (*Tableau 3*).



**Figure 3 :** Zone de croissance naturelle de la Spiruline dans le monde (Fox, 1999)

**Tableau 3** : Sites géographiques où se trouve naturellement le genre *Arthrospira*  
(Scheldeman *et al.* 1999).

<b>Afrique</b>	
<b>Algérie</b>	Tamanrasset (Boileau, 1988 in FOX, 1999),
<b>Tchad</b>	La région du Kanem : les lacs Latir, Ouna, Borkou, Katam, Yoan, Leyla, Bodou, Rombou, Moro, Mombolo, Liwa, Iseïrom, Ounianga kebir
<b>Soudan</b>	Cratère du Djebel Marra
<b>Djibouti</b>	Lac Abber
<b>Ethiopie</b>	Lacs Aranguadi, Lesougouta, Nakourou, Chiltu, Navasha, Rodolphe
<b>Congo</b>	Mougounga
<b>Tanzanie</b>	Lac Natron
<b>Kenya</b>	Lacs Nakuru, Elmenteita, Cratère, Natron
<b>Tunisie</b>	Lac Tunis (Belkir, 1978), Chott el Jend (Belkir, 1997)
<b>Zambie</b>	Lac Bangweoulou
<b>Madagascar</b>	Beaucoup de petits lacs près de Toliara (Nguyen Kim Ngam, 1994)
<b>Asie</b>	
<b>Inde</b>	Lac Lonar (Damle, 1978), un réservoir près de Madurai (Bai, 1984), un réservoir près de Calcutta (Biswas), Lac Nagpur (Pargaonkar, 1981)
<b>Myanmar</b>	Lacs Twyn Taung, Twyn Ma et Taung Pyank (Min Thein, 1984)
<b>Sri Lanka</b>	Lac Beira
<b>Pakistan</b>	Mares près de Lahore (Ghose, 1924) (Fox, 1980)
<b>Thaïlande</b>	Lacs d'effluents d'une usine de tapioca, province de Radburi, 80 km au S.O. de Bangkok (Tanticharoen, 1985)
<b>Azerbaïdjan</b>	(Woronichin, 1924)
<b>Amérique du sud</b>	
<b>Pérou</b>	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)
<b>Mexique</b>	Lac Texcoco (David, 1976), Lac Cratère (Durand-Chastel, 1990)
<b>Uruguay</b>	Montevideo, 1884, signalé par Arechavaleta in Wittrock, Nordstedt
<b>Pérou</b>	trouvé en association avec <i>Cladophora</i> près de l'île d'Amantani dans le lac Titicaca (Fox, 1993), spécimen de <i>Cladophora</i> de Gilles Planchon & Rosario Fuentes
<b>Equateur</b>	Lac Quiliotoa : cratère diamètre 1 kilomètre (Yann Leroux, 1998)
<b>Amérique du nord</b>	
<b>Californie</b>	Oakland, Key Route Power House (Gardner, 1917) ; Del Mar Beach (Lewin, 1969) Un moulin à huile (Knutsen, 1994)
<b>Haïti</b>	Lac Gonâve (Pierre, 1986)
<b>République Dominicaine</b>	Lac Enriquillo (Durand Chastel, 1993)
<b>Europe</b>	
<b>France</b>	Camargue (Planchon et al. 1994)
<b>Hongrie</b>	(Kiss, 1957)
<b>Site où la spiruline a été introduite par le flamant nain, <i>Phoenicoparrus jamesi</i>, en Afrique et en Asie, et le flamant de James, <i>Phoenicoparrus jamesi</i>, en Amérique du Sud (Ogilvie et al. 1986)</b>	
<b>Ethiopie</b>	Lac Abiata
<b>Kenya</b>	Lac Rodolphe, Lac Hannington

<b>Tanzanie</b>	Lac Manyara, Lac Rukua
<b>Zambie</b>	Lac Mweru
<b>Botswana</b>	Makgadikgadi Sait Pans
<b>Namibie</b>	Etosha Sait Pan
<b>Afrique du Sud</b>	État Libre d'orange, près de Vaaldam
<b>Bolivie</b>	Lacs Colorado, Poopo, Chalviri, Salar d'Uyuni
<b>Chili</b>	Aguas Calientes, Lagunas Brava, Lac Vilama, Salar de Surire
<b>Mauritanie</b>	Côte sud
<b>Inde</b>	Rann of Kutch, Gujarat
<b>Madagascar</b>	Côte ouest

## ***2. Tolérance aux facteurs du milieu***

### ***2.1. 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).

### ***2.2. Lumière :***

La lumière est la source d'énergie primaire des organismes réalisant la photosynthèse. Pour les micro-algues les durées et les périodes d'ensoleillement seront déterminantes. Les régions les plus ensoleillées seront les plus favorisées pour la culture de micro-algues y compris la spiruline.

Une très forte lumière (plein soleil) peut être dangereuse dans les cas suivants :

- une brusque illumination d'une culture froide (moins de 14°C à 15°C),
- une culture très chaude, (réchauffement)
- une culture très diluée (Secchi de plus de 6 cm)

On réduit volontairement la luminosité par ombrage si l'on désire freiner la croissance de la spiruline, ou si l'on se trouve dans l'un des trois cas précédents. (Jourdan, 2006).

### ***2.3. pH :***

Le pH optimum d'un milieu de culture neuf à confectionner dépend de son utilisation. S'il doit être inséminé pour démarrer une nouvelle culture, son pH doit être d'au moins 9 : s'il est trop bas la culture risque de mal démarrer, avec formation de grumeaux ou précipitation de la spiruline au fond (Fox, 1999). Par contre si le milieu neuf doit servir d'appoint à une culture

existante son pH peut être de 8, ce qui contribue à maintenir le pH de la culture suffisamment bas par un apport de bicarbonate.

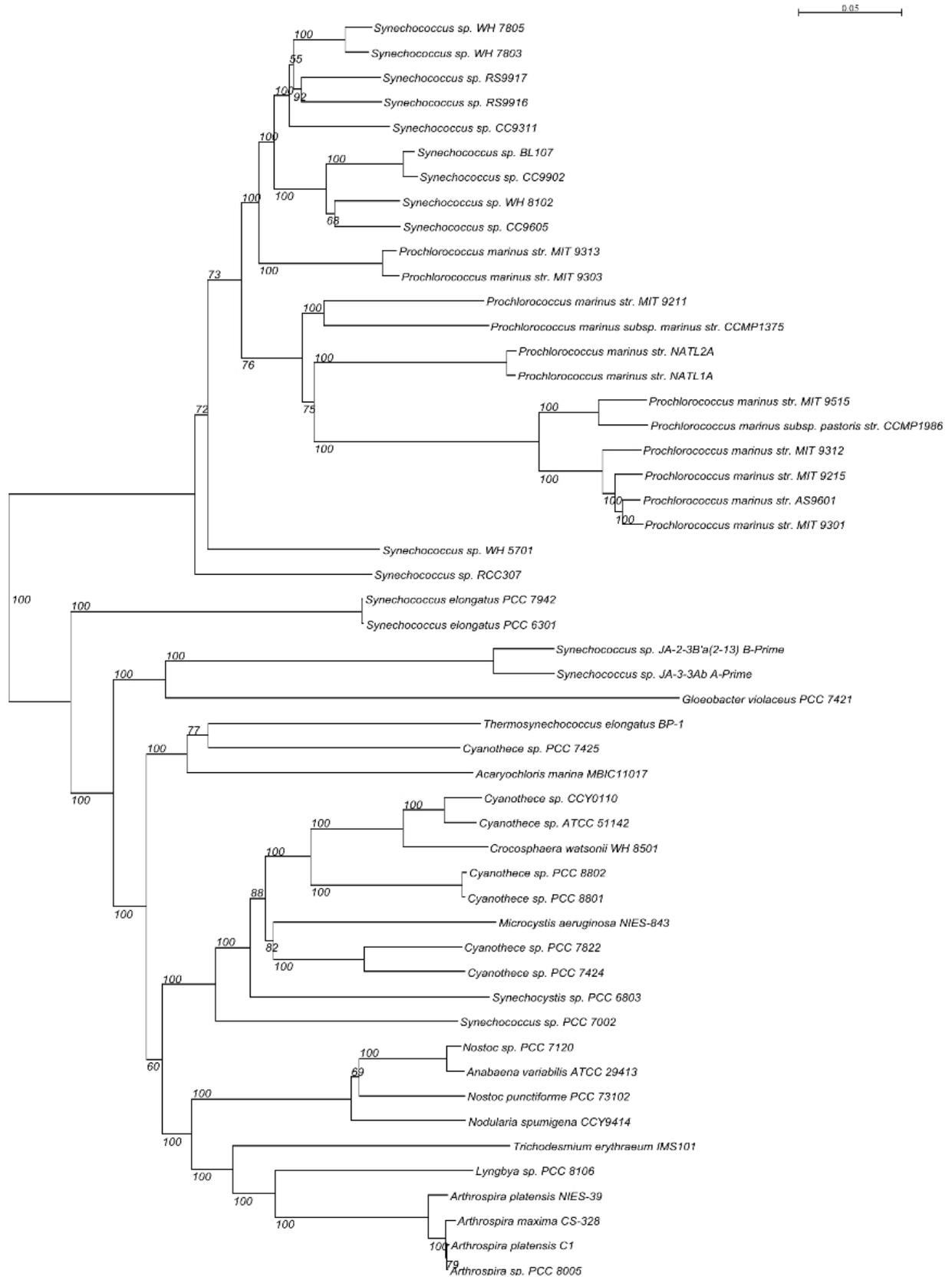
#### **2.4. Salinité :**

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).

#### **3. Phylogénie moléculaire (*Arthrospira* et *Spirulina*)**

La différenciation du genre *Arthrospira* des autres genres (surtout le genre *Spirulina*) n'a pas été toujours évidente, en raison de l'incorrecte unification des deux genres par (Geitler 1932). Plusieurs études basées sur des caractères phénotypiques comme : paramètres de l'hélice (épaisseur, longueur, taille du trichome, paroi cellulaire, structure de la membrane cellulaire, vésicules de gaz... etc.), ont montré l'existence de différences entre les deux genres (Desikachary, 1959 ; Hindak, 1985 ; Guglielmi *et al.* 1993 ; Tomaselli, 1997). Des études phylogénétiques utilisant des séquences du gène 16S rRNA (gène universellement présent dans les cyanobactéries et a une fonction conservée) ont montré que beaucoup de genres de cyanobactéries unicellulaires filamenteuses non hétérocystées (ne possèdent pas de cellule fixatrice d'azote) sont probablement polyphylétiques et ne peuvent pas être regroupés comme un taxon naturelle, alors que les genres hétérocystés forme un groupe monophylétique (Ballot, 2004). En plus des analyses génétiques plus récentes basées sur le gène 16S rRNA réalisées sur deux souches d'*Arthrospira* (PCC 7345 et PCC 8005) en comparaison avec une autre souche du genre *Spirulina* (PCC 6313) (Ballot, 2004), ont révélé que le genre *Arthrospira* est très éloigné du genre *Spirulina* (Nelissen *et al.* 1994 ; Manen et Falquet 2002 ; Litvaitis, 2002) et la séparation entre ces deux genres a été acceptée dans le Bergey's Manual of Bacteriology (Castenholz *et al.* 2001) . Il est important de préciser cette confusion car le genre *Arthrospira* est largement commercialisé sous le nom de Spirulina® comme supplément alimentaire pour les humains et les animaux (Muhling *et al.* 2006).

L'arbre phylogénétique suivant (*figure 4*) des cyanobactéries a été reconstruit avec des informations évolutives intégrées dans des protéines ribosomales conservées et concaténées. *A. platensis* C1 a été positionné dans le genre *Arthrospira* avec 100% de la valeur d'amorçage. La souche la plus proche est *Arthrospira sp. PCC 8005* avec 97,43% d'identité de séquence, tandis que les autres souches de ce genre partagent 94,93 à 96,58%. L'ordre apparent le plus proche est *Nostocales* avec environ 70% (Cheevadhanarak *et al.* 2012).



**Figure 4 :** L'arbre phylogénétique de 51 protéines ribosomales concaténées de cyanobactéries (Cheevadhanarak *et al.* 2012).

La topologie principale est en accord avec les inférences antérieures de la phylogénie de ce taxon avec l'ARNr 16s basé sur le modèle de substitution GTR + G + I (Schirrmester et al. 2011). L'arbre est construit à l'aide de la méthode Neighbor-Joining et de 1000 réaménagements pour calculer les valeurs bootstrap. *A. platensis* C1 a été regroupé avec d'autres souches dans l'ordre *Oscillatoriales* et a été clairement séparé des espèces apparentées à l'ordre *Nostocales*. L'arbre phylogénétique protéique ribosomique conservé et concaténé indique la monophylie du genre *Arthrospira* (Cheevadhanarak et al. 2012).

#### **4. Analyse nutritionnelle**

Les différentes études réalisées afin de déterminer de façon précise les teneurs en nutriments et micronutriments de la spiruline, montrent des écarts assez conséquents, cela vient du fait qu'il existe différentes souches de spirulines, et la principale raison invoquée par les chercheurs, est que les différentes méthodes de culture, récolte, séchage et conservation des échantillons influencent davantage les écarts de composition biochimique. C'est pourquoi toutes les spirulines proposées sur le marché mondial ne sont pas exactement identiques sur le plan de leur composition nutritionnelle (Falquet, 2006). Le tableau suivant (*Tableau 4*) indique la composition quantitative moyenne en nutriments et micro-nutriments de la spiruline.

**Tableau 4 :** Composition moyenne globale de la spiruline (Jourdan, 2006)

Nutriments	Teneurs en % du poids de la spiruline
Protéines	65 %
Glucides	15 %
Minéraux	7 %
Lipides	6 %
Eau	5 %
Fibres	2 %

#### **4.1. Teneurs en éléments organiques**

##### **4.1.1. Protéines**

La teneur en protéines de la spiruline oscille entre 50 et 70% de son poids sec. Ces valeurs sont tout à fait exceptionnelles, même parmi les micro-organismes ; d'autre part, les meilleures sources de protéines végétales n'arrivent qu'à la moitié de ces teneurs, la farine de soja par exemple ne contenant que 35% de protéines brutes (*Tableau 5*). En termes de

rendement en protéines, il faut aussi considérer que la totalité de la spiruline est consommable (contre une petite fraction pour les végétaux habituels). (Falquet, 2006).

**Tableau 5 :** Comparative des taux de protéines de quelques aliments (Falquet, 1996) (Antanna Technologie).

<i>Aliment</i>	<i>Taux de protéines en %</i>
Spiruline	60 à 70
Farine de soja	35
Haricots	30 à 35
Bœuf	18 à 22
Œufs	12 à 16
Lait	3

#### 4.1.2. Teneurs en acides aminés

D'un point de vue qualitatif, les protéines de la spiruline sont complètes, car tous les acides aminés essentiels y figurent (*Tableau 6*), ils représentent entre 40 à 46% du poids total des protéines (Bujard *et al.* 1970). Parmi ces acides aminés essentiels, les plus faiblement représentés sont les acides aminés soufrés : méthionine et cystéine (Clément *et al.* 1967, Bujard *et al.* 1970, AFAA, 1982.).

**Tableau 6 :** Teneurs en pourcentage des acides aminés dans les protéines totales (Antanna Technologie)

	<i>% de protéines totales Minimum</i>	<i>% de protéines totales Maximum</i>
<i>Acides aminés essentiels</i>		
Isoleucine	5.81	6.15
Leucine	8.17	9.26
Lysine	4.93	5.63
Méthionine	2.65	3.05
Phénylalanine	4.62	5.56
Thréonine	5.30	5.87
Tryptophane	1.37	1.59
Valine	7.00	8.45
<i>Total</i>	39.85	45.56
<i>Acides Aminés non essentiels</i>		
Alanine	8.20	8.28
Arginine	7.43	8.42
Acide aspartique	9.05	9.95
Cystine	0.93	0.94
Acide glutamique	12.59	13.82
Glycine	4.87	5.28
Histidine	1.48	1.52
Proline	4.18	4.46
Sérine	5.30	5.63
Azote de l'acide nucléique	1.25	1.99
Acide ribonucléique (ARN)	2.20	3.50
Acide désoxyribonucléique (ADN)	0.63	1.00

### **4.1.3. Glucides**

Les glucides constituent globalement 15 à 25% de la matière sèche des spirulines. L'essentiel des glucides assimilables est constitué de polymères tels que des glucosannes aminés (1.9% du poids sec) et des rhamnosannes aminés (9.7%) ou encore de glycogène (0.5%). Les glucides simples ne sont présents qu'en très faibles quantités (glucose, fructose et saccharose), on trouve aussi des polyols comme le glycérol, le mannitol et le sorbitol. (Ciferri, 1983; Flaquet, 2006).

### **4.1.4. Teneurs en vitamines**

La Spiruline est une algue vitaminée (*Tableau 7*), 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  $\beta$ -carotène (Belay, 1997, Sall et al, 1999, Cruchot, 2008).

**Tableau 7 :** Teneurs en vitamine (mg/kg) de matiere seche de la spiruline (Antanna Technologie)

<i>Vitamines</i>	<i>Teneur (mg/Kg de matière sèche)</i>	<i>Besoin/jour (mg pour un adulte)</i>
$\beta$ Carotène (pro-A)	1 700	
Thiamine (B1)	55	1.5
Riboflavine (B2)	40	1.8
Pyridoxine (B6)	3	2
Cyanocobalamine (B12)	0.4	0.003
Acide ascorbique (C)	90	15-30
Tocophérol (E)	190	/
Acide nicotinique (PP)	118	/
Acide folique	0.5	0.4
Inositol	350	/
$\delta$ -Ca-Panthoténate	11	6-10
Biotine (H)	0.4	0.1-0.3

### **4.1.5. Teneur en lipides**

La composition en lipides totaux se caractérise par un bon équilibre entre acides gras saturés et acides gras polyinsaturés (*Tableau 8*). La composition des principaux acides gras

révèle la présence d'une forte concentration en acides gras essentiels, incluant des oméga-3 et des oméga-6 qui préviendraient l'accumulation de cholestérol (Von der wied, 2011). La spiruline est considérée comme l'une des meilleures sources alimentaires connues d'acide  $\gamma$ -linoléique, après le lait humain et quelques huiles végétales peu courantes, fort chères et non chauffées (huiles d'onagre, de bourrache, de pépin de cassis et de chanvre) (Cruchot, 2008).

**Tableau 8 :** Teneurs en lipides (mg/kg) de matière sèche de la spiruline (Antanna Technologie)

<i>Lipides totaux</i>	<i>% minimum</i>	<i>% maximum</i>
	4.9	5.7
	<i>Teneur minimale en mg/kg de matière sèche</i>	<i>Teneur maximale en mg/kg de matière sèche</i>
<b><i>Acides gras saturés</i></b>		
Laurique (C12)	180	229
Myristique (C14)	520	644
Palmitique (C16)	16 500	21 141
Stéarique (C18)	Traces	353
<b><i>Acides gras non saturés</i></b>		
Palmitoléique (C16)	1 490	2 035
Palmitolinoléique (C16)	1 750	2 565
Heptadécanoïque (C17)	90	142
Oléique (C18)	1 970	3 009
Linoléique (C18)	10 920	13 784
$\gamma$ linoléique (C18)	8 750	11 970
$\alpha$ Linoléique (C18)	699	700

#### ***4.2. Teneurs en Oligo-éléments***

Si les teneurs en éléments organiques des spirulines sont bien connues les données sur les éléments minéraux sont limitées. Les spirulines sont connues pour concentrer les éléments capables de former des cations. Elles concentrent donc aussi bien les oligoéléments essentiels ou nécessaires pour le corps humain que les éléments toxiques. Une étude a été menée en 2016 pour déterminer les teneurs en éléments majeurs et traces des spirulines (*Arthrospira platensis*) originaires de France, Madagascar, Inde, Costa Rica et Equateur (Vicat *et al.* 2016).

#### 4.2.1. Teneurs en éléments majeurs

Le contenu en éléments majeurs est variable (*Tableau 9*). Les teneurs en Na, K, P et Mg sont élevées. Les teneurs en Ca et en Fe sont plus faibles et les teneurs en Mn sont très variables. Le Ti n'est pas quantifié sauf dans la spiruline de l'Equateur. L'Al est quantifié dans les spirulines de France et de l'Equateur. Le Si n'est pas quantifié (Vicat *et al.* 2016).

**Tableau 9 :** Teneurs en éléments majeurs (g/kg) des spirulines de France (SP14, SP15), Madagascar (SP19), Inde (SP21), Costa Rica (SP25) et Equateur (SP26) (Vicat *et al.* 2016).

éléments	SP14	SP15	SP19	SP21	SP25	SP26
Si	<0.234	<0.234	<0.234	<0.234	<0.234	<0.234
Al	<0.040	0.122	<0.040	<0.040	<0.040	0.122
Fe	0.410	0.455	0.511	0.462	0.434	0.701
Mn	0.081	0.023	0.023	0.008	0.015	0.031
Mg	2.778	3.060	2.460	2.599	2.792	2.864
Ca	0.771	1.264	0.972	1.637	0.758	1.622
Na	12.064	11.567	18.784	14.488	9.384	3.995
K	13.559	15.152	17.408	18.288	18.645	16.121
Ti	<0.030	<0.030	<0.030	<0.030	<0.030	0.084
P	9.112	8.776	9.593	9.893	11.198	10.720

#### 4.2.2. Teneurs en éléments toxiques

Les teneurs en éléments toxiques (As, Cd, Hg, Pb) sont faibles (*Tableau 10*) (Vicat *et al.* 2016). L'As n'est pas quantifié, Cd, Hg et Pb sont, lorsqu'ils sont quantifiés, à des teneurs inférieures aux normes française de qualité (Cruchot, 2008).

**Tableau 10 :** Teneurs en éléments toxiques (mg/kg) des spirulines de France (SP14, SP15), Madagascar (SP19), Inde (SP21), Costa Rica (SP25) et Equateur (SP26) (Vicat *et al.* 2016).

	SP14	SP15	SP19	SP21	SP25	SP26
As	<2.52	<2.52	<2.52	<2.52	<2.52	<2.52
Cd	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.08
Hg	0.025	<0.010	0.011	0.017	<0.010	<0.010
Pb	<0.54	<0.54	<0.54	<0.54	0.68	0.62

### 4.2.3. Teneurs en éléments traces

Les autres éléments traces sont à des teneurs très variables (*Tableau 11*). Tous les échantillons contiennent du Rb, du Sr et du Zn. Les éléments Ag, Be, Bi, Cs, Ga, Ge, In, Li, Sb, W, Y, Zr sont à des teneurs inférieures aux limites de détection (*Vicat et al. 2016*).

**Tableau 11** : Teneurs en éléments traces (mg/kg) des spirulines de France (SP14, SP15), Madagascar (SP19), Inde (SP21), Costa Rica (SP25) et Equateur (SP26) (*Vicat et al. 2016*).

	<b>SP14</b>	<b>SP15</b>	<b>SP19</b>	<b>SP21</b>	<b>SP25</b>	<b>SP26</b>
<b>Ag</b>	<0.06	<0.06	<0.06	<0.06	<0.06	<0.06
<b>Ba</b>	<1.60	<1.60	<1.60	<1.60	15.9	3.68
<b>Be</b>	<0.13	<0.13	<0.13	<0.13	<0.13	<0.13
<b>Bi</b>	<0.33	<0.33	<0.33	<0.33	<0.33	<0.33
<b>Co</b>	0.55	<0.08	0.25	<0.08	<0.08	0.54
<b>Cr</b>	<1.33	<1.33	<1.33	<1.33	<1.33	10.88
<b>Cs</b>	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04
<b>Cu</b>	169.20	15.96	<0.80	7.981	<0.80	6.43
<b>Ga</b>	<0.24	<0.24	<0.24	<0.24	<0.24	<0.24
<b>Ge</b>	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
<b>Hf</b>	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02
<b>In</b>	<0.19	<0.19	<0.19	<0.19	<0.19	<0.19
<b>Li</b>	<0.14	<0.14	<0.14	<0.14	<0.14	<0.14
<b>Mo</b>	0.17	<0.15	0.193	<0.15	<0.15	0.52
<b>Nb</b>	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	0.26
<b>Ni</b>	3.98	<2.15	<2.15	<2.15	<2.15	<2.15
<b>Rb</b>	5.22	2.67	6.79	2.94	4.36	8.38
<b>Sb</b>	<0.19	<0.19	<0.19	<0.19	<0.19	<0.19
<b>Sn</b>	<0.59	<0.59	<0.59	23.16	<0.59	0.98
<b>Sr</b>	1.40	5.67	2.25	14.96	20.28	9.14
<b>Ta</b>	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.02
<b>Th</b>	<0.01	0.02	0.08	<0.01	<0.01	0.02
<b>U</b>	<0.01	<0.01	0.05	0.11	<0.01	<0.01
<b>V</b>	<0.31	<0.31	<0.31	14.96	<0.31	<0.31
<b>W</b>	<0.13	<0.13	<0.13	<0.13	<0.13	<0.13
<b>Y</b>	<0.39	<0.39	<0.39	<0.39	<0.39	<0.39
<b>Zn</b>	28.25	69.15	8.53	43.68	67.52	67.48
<b>Zr</b>	<0.96	<0.96	<0.96	<0.96	<0.96	<0.96

#### **4.2.4. Teneurs en Terres Rares**

Le contenu en Terres Rares est très faible (*Tableau 12*). Eu, Gd, Tb et Dy sont à des teneurs inférieures aux limites de détection. Ce, Er, Ho, La, Lu, Nd, Pr, Sm et Yb ont parfois été quantifiés à de très faibles teneurs (Vicat *et al.* 2016).

**Tableau 12** : Teneurs en Terres Rares (mg/kg) des spirulines de France (SP14, SP15), Madagascar (SP19), Inde (SP21), Costa Rica (SP25) et Equateur (SP26) (Vicat *et al.* 2016).

	<b>SP14</b>	<b>SP15</b>	<b>SP19</b>	<b>SP21</b>	<b>SP25</b>	<b>SP26</b>
<b>La</b>	<0.069	0.085	<0.069	<0.069	<0.069	<0.069
<b>Ce</b>	<0.081	<0.081	<0.081	<0.081	<0.081	0.109
<b>Pr</b>	<0.005	0.020	<0.005	<0.005	<0.005	0.014
<b>Nd</b>	<0.015	0.072	0.017	<0.015	<0.015	0.050
<b>Sm</b>	<0.008	0.012	<0.008	<0.008	<0.008	0.011
<b>Eu</b>	<0.004	<0.004	<0.004	<0.004	<0.004	<0.004
<b>Gd</b>	<0.016	<0.016	<0.016	<0.016	<0.016	<0.016
<b>Tb</b>	<0.008	<0.008	<0.008	<0.008	<0.008	<0.008
<b>Dy</b>	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
<b>Ho</b>	<0.001	0.002	<0.001	<0.001	<0.001	0.002
<b>Er</b>	<0.003	0.004	0.005	<0.003	<0.003	0.004
<b>Tm</b>	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
<b>Yb</b>	<0.003	0.005	0.007	<0.003	<0.003	0.005
<b>Lu</b>	<0.001	<0.001	0.002	<0.001	<0.001	<0.001

### **5. Aspects toxicologiques**

La spiruline destinée à l'alimentation humaine est autorisée à la vente depuis de nombreuses années dans les pays industrialisés. Elle est classée GRAS (Generally Recognized As Safe) par la Food and Drug Administration aux Etats-Unis (Falquet, 2006).

#### **5.1. Toxiques minéraux**

Dans plusieurs cas, les toxiques tels que le plomb, le mercure et l'arsenic ainsi que le fluor (Santillan, 1974) ont été donnés comme non détectables; pourtant, une étude plus détaillée montre que dans le cas de spiruline récoltée en milieu naturel, les teneurs en arsenic et surtout en fluorures peuvent être relativement élevées (*Tableau 13*). Ces particularités proviennent certainement des compositions géologiques des régions concernées (Boudène, 1975). Ces problèmes de toxicité semblent inexistantes pour la spiruline cultivée en milieu artificiel puisque les valeurs observées sont en dessous des normes de l'OMS et du FAO.

On trouve en moyenne :

**Tableau 13** : Les moyennes observées des éléments toxiques (Falquet, 2006)

<b>Eléments</b>	<b>Moyenne</b>
Arsenic	0.06 -2 ppm
Sélénium*	0.01 -0.04 ppm
Cadmium	0.01 - 0.1 ppm
Mercure	0.01 - 0.2 ppm
Plomb	0.6 - 5.1 ppm
Fluor*	112 - 630 ppm

\* Le fluor et le sélénium jouent un rôle essentiel dans l'alimentation humaine, toutefois ils présentent des dangers, en cas de surdoses, que les oligo-éléments.

### **5.2. Toxiques organiques**

Les éventuelles propriétés toxiques des paraffines présentes dans la spiruline ont été étudiées sur le rat et le porc (Tulliez, 1975). La rétention de l'heptadécane (constituant majeur des paraffines de la spiruline) a été étudiée chez ces animaux recevant de la spiruline comme seule source de protéines. Chez le rat on constate une accumulation qui se stabilise vers le quatrième mois, à une valeur finale qui dépend de la teneur en lipides de l'animal. Chez le porc, l'heptadécane semble beaucoup mieux métabolisé et cet hydrocarbure est très faiblement retenu. Compte tenu de ce que l'on connaît de la toxicité des hydrocarbures, aucune toxicité aiguë ou chronique n'est à craindre (Tulliez, 1975).

Le 3-4-benzopyrène a été dosé dans la spiruline car il constitue un bon indicateur de la présence des hydrocarbures polycycliques aromatiques, qui sont de puissants mutagènes et cancérigènes. Les quantités observées, 2-3 ppb, sont bien en dessous de ce que l'on trouve dans la plupart des légumes courants (Chamorro-Cevallos, 1980, Bories, 1975).

### **5.3. Cyanotoxines**

Certaines cyanobactéries produisent de puissantes toxines agissant sur le système nerveux ou sur le foie. Aucune contamination par de tels microorganismes n'a été mise en évidence dans le cas de spiruline cultivée, ce qui semble lié à son milieu de culture très particulier (Falquet, 2006).

#### ***5.4. Résidus de pesticides***

La quasi-absence de ravageurs ou de parasites dans les cultures de spiruline rend inutile l'usage de quelque pesticide que ce soit. Il n'en reste pas moins que l'on ne peut exclure d'emblée une contamination provenant de l'eau utilisée pour la culture ou de l'air, sous forme d'aérosols ou de poussières. La spiruline elle-même est très sensible à la plupart des herbicides (Cohen, 1997). Etrangement, la spiruline est capable de dégrader les herbicides de type « RoundUp » (glyphosate) qui agissent sur la synthèse de la chlorophylle : elle les minéralise totalement et en utilise le phosphore ainsi libéré (Trzebiatowska, 2004). Une fois encore, l'alcalinité du milieu de culture représente une certaine protection puisque qu'elle encourage l'hydrolyse des composés des herbicides. L'ensemble de ces données explique sans doute l'absence dans la littérature de cas significatifs de contamination de spiruline par des pesticides.

#### ***5.5. Réactions allergiques***

Contrairement à l'immense majorité des aliments courants, la spiruline ne semble pratiquement jamais provoquer de réactions allergiques, que ce soit par ingestion ou par contact. Au contraire, une activité anti-allergique semble liée à ce produit (Yang, 1997).

#### ***5.6. Risques de surdoses***

Il n'existe à ce jour aucun cas de surdose de spiruline documenté dans la littérature scientifique. Des consommateurs de plus de 10 g/jour pendant plusieurs années d'affilé ne rapportent aucuns effets négatifs. En ce qui concerne le risque aigu, là non-plus aucune donnée ne vient fixer de limite, des consommations de plus de 100 g / jour n'ont semble-t-il eu aucune conséquence particulière (Falquet, 2006).

### ***6. Production de la spiruline***

Pour couvrir la demande croissante, la spiruline doit être produite en grande quantité dans des bassins de culture. En fonction de la surface totale d'exploitation des bassins et des moyens technologiques utilisés, on distingue la culture artisanale et la culture industrielle. (Jourdan, 2006).

#### ***6.1. Cultures artisanales :***

Consiste à construire des bassins et un réservoir en béton près d'un lac. Cette méthode nécessite le remplissage du réservoir par de l'eau pompée du lac puis passe par gravité dans un filtre à sable avant d'arriver dans les bassins de culture de spiruline. 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 (Scheldeman *et al.* 1999). Cette culture dépend de plusieurs facteurs :

### **6.1.1. Facteurs climatiques :**

- Température : Idéalement comprise entre 37°C à 40°C (Jourdan, 2006).
- Pluviométrie : Les eaux de pluie sont intéressantes car propres et faible en minéraux, tout le manque ou l'excès d'eau reste néfaste à la culture. Sous les climats à faible pluviométrie, ou à saison sèche longue, il est donc nécessaire de prévoir des réservoirs d'eau de pluie pour compenser l'évaporation des bassins (Scheldeman *et al.* 1999).

### **6.1.2. Facteurs concernant les bassins de culture :**

Les bassins en dur sont les plus durables (durée moyenne de 10 ans) et les plus faciles à nettoyer (Cruchot, 2008). Il est recommandé qu'ils soient de forme arrondie et sans angles vifs et un fond plat avec une légère pente vers l'ouverture de vidange. La profondeur idéale est comprise entre 20 et 40 cm (Jourdan, 2006).

- Couverture : Il est souvent utile, voire nécessaire, d'installer une serre ou un toit sur le bassin cela permet de le protéger contre les excès de pluie, de soleil ou du froid, et contre les chutes de feuilles, fientes d'oiseaux, vents de sable et débris divers, sans pour autant empêcher l'aération. (Scheldeman *et al.* 1999).

- Agitation : 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. La fréquence d'agitation est de minimum 4 fois par jour si agitation manuelle, agitation continue si le système est électrique et sans risque de rompre les filaments, enfin agitation pendant 15 minutes par heure en utilisant des pompes immergées (Cruchot, 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. (Baillinger, 1994) (Jourdan, 2006).

### **6.1.3. Milieu de culture :**

En général, les eaux de pluie, de source ou de forage conviennent bien pour la préparation d'un milieu de culture. La salinité est apportée par les produits chimiques servant d'engrais et complétée par du chlorure de sodium et doit être au minimum égale à 13 g/l correspondant à la somme des poids de tous les sels dissous dans le milieu (Belay *et al.* 1996) (Jourdan, 2006) (Cruchot, 2008), l'alcalinité est apportée par le bicarbonate de sodium ou le carbonate de sodium assurent l'alcalinité du milieu et enfin pour assurer la croissance de la spiruline on ajoute des intrants qui contiennent de l'azote, du phosphore et du potassium, et des éléments qui sont peu présents dans l'eau, tel que : le soufre, le magnésium, le calcium et le fer (Jourdan, 2006). 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 leurs élaborations. (Belay *et al.* 1996).

#### **6.1.4. Récolte**

Il vaut mieux récolter le matin car la teneur de la spiruline en protéines y est généralement plus élevée que le soir, mais aussi pour d'autres raisons: chaleur excessive ensuite, nécessité de mettre la récolte à sécher dès que possible (surtout en cas de séchage solaire). Par temps couvert cette obligation de récolte tôt le matin est évidemment moins impérieuse, et par beau temps on peut toujours ombrer le filtre. Quel que soit le temps, si l'on opère en plein air, il faut couvrir le filtre pour éviter que la biomasse récoltée ne se dégrade et ne se salisse (Jourdan, 2006).

##### **6.1.4.1. Filtration**

La récolte consiste à filtrer une partie de la culture sur une toile fine (maille 25 à 50  $\mu$ ), en recyclant le filtrat dans le bassin, directement ou à travers un système de purification (filtre à sable, décantation, oxydation biologique). La culture est envoyée au filtre à travers un tamis de maille 300  $\mu$  destiné à intercepter les corps étrangers tels qu'insectes, larves, feuilles, boues ou grumeaux de spirulines. Un tamis de maille plus fine peut être nécessaire pour arrêter d'éventuels rotifères (l'ouverture de maille est choisie pour ne pas arrêter trop de spirulines). Après arrêt de l'envoi de culture sur le filtre, on laisse égoutter, puis on rassemble la pâte verte obtenue, dite "biomasse". La biomasse de spirulines contenant moins de 75 % de spirulines droites et provenant d'une culture en bon état, de pH et teneur en ammonium pas trop élevés, se filtre facilement et s'essore facilement par pressage. Une toile de filtre en monofilaments polyamide (Nylon) ou polyester (Tergal) est préférable à une toile en coton parce qu'elle facilite le décollement de la biomasse récoltée et se lave ensuite plus facilement (Jourdan, 2006).

##### **6.1.4.2. Lavage et Essorage (pressage)**

D'une manière générale il est recommandé de ne laver la biomasse que si :

- on doit récolter une culture sale ou malodorante,
- ou trop riche en nitrates,
- si l'essorage est impossible,
- ou pour produire de la biomasse pour régimes sans sel à consommer fraîche.

Si certaines spirulines supportent le lavage à l'eau douce, d'autres se décolorent ou éclatent à son contact et ne peuvent être lavées qu'à l'eau salée ou avec du milieu de culture neuf à la même salinité (ou plus exactement à la même force ionique) que le bassin récolté. En effet les spirulines mises en contact avec un milieu de salinité différente de leur milieu d'origine

réagissent quasi instantanément en absorbant ou perdant de l'eau pour se mettre en équilibre osmotique avec le milieu, ce qui peut faire éclater leur paroi. Les ondulées (Paracas) résistent mieux à l'éclatement que les spiralées (Lonar). Le lavage risque aussi de causer des contaminations microbiennes. Il faut noter aussi que la spiruline lavée à l'eau douce est très fade au goût (Jourdan, 2006). L'essorage peut se pratiquer avec uneessoreuse ou sur filtre à vide (trompe à eau ou pompe à vide), mais plus simplement par pression de la manière suivante : la biomasse égouttée est placée dans une toile du même type que celle utilisée pour la filtration, et elle est pressée entre deux nattes ou planches rainurées: la majeure partie de l'eau libre est exprimée par la pression (0,2 kg/cm<sup>2</sup> suffit mais on peut monter à 1 kg/cm<sup>2</sup>). La presse peut n'être qu'une pile de poids, mais un presseur à vis supérieure, ou un cric de voiture pour exercer la pression, ou une presse à fromage à poids et levier. L'essorage/pressage doit se faire sans tarder et il faut surtout éviter que la biomasse souffre de la chaleur en attendant. Le pressage dure au moins 15 minutes, car il faut du temps au liquide pour cheminer à travers les très fins interstices ou capillaires entre les spirulines comprimées. La biomasse essorée ou pressée doit être refroidie le plus tôt possible pour qu'elle ne s'abîme pas. Même si elle doit être séchée, on a intérêt à la mettre au frigo en attendant l'extrusion, sinon des odeurs désagréables peuvent se dégager lors de l'extrusion (Jourdan, 2006).

#### **6.1.4.3. Extrusion et Séchage**

Le séchage est le seul moyen sûr de conserver et de distribuer la spiruline sans chaîne de froid. Dans l'industrie la spiruline est classiquement séchée par « atomisation » (spray-drying), dans un courant de gaz de combustion à très haute température mais pendant un temps très court (c'est en fait le jus de spiruline broyée que l'on sèche). Dans la production artisanale, au contraire, ce sont les filaments de spiruline entiers que l'on sèche : le temps de séchage est plus long, mais l'intérieur des cellules n'est pas soumis au contact direct des gaz chauds. Si la spiruline pressée ne peut être séchée de suite, il faut la conserver en récipient fermé au réfrigérateur bien froid et pas trop longtemps (sinon elle dégage une odeur désagréable lors de l'extrusion). La biomasse lavée ne peut se conserver, même au réfrigérateur (sauf si elle a été lavée avec de l'eau salée isotonique), à l'exception des souches Paracas qui supportent bien le lavage à l'eau douce (Jourdan, 2006).

##### **- Extrusion**

Le séchage doit être suffisamment rapide pour que le produit sèche sans fermenter. La biomasse issue du pressage est d'abord répartie par extrusion en "spaghetti" sur un plateau, si la biomasse est trop fluide, on l'étale en couche mince sur un film de polyéthylène (méthode

"indienne"). La biomasse est séchée au soleil, ou, dans un courant d'air à faible humidité relative et forte capacité d'absorption d'eau (séchoir solaire indirect, ou électrique, ou à gaz, ou déshumidificateur), jusqu'à ce qu'elle ne soit plus molle du tout, se détache facilement du support, et se broie facilement. L'extrusion en spaghetti peut se faire à l'aide d'un décorateur de gâteau, ou avec un instrument de cuisine courant ou une boîte à fond percé de petits trous et d'un piston, ou à l'aide d'un pistolet à colle silicone modifié (bouchon PVC de 50 mm percé de trous de 2 mm), ou avec un poussoir à saucisses, etc. (Jourdan, 2006).

- ***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. 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.

Dans la pratique, en général il se situe autour de 4 heures, mais il est parfaitement possible de sécher en une heure si l'on veut. Une biomasse de bonne qualité, pressée bien ferme, sèche sans que les cylindres des spaghettis ne se déforment : ils restent cylindriques, mais évidemment de diamètre réduit (rétréci) (Jourdan, 2006). Le séchage peut se faire en deux stades, surtout lorsque l'air est humide :

a) un séchage à basse température (40-50°C) mais à gros débit d'air (vitesse d'air de 1 m/s) autorisant une charge élevée de biomasse.

b) un séchage à débit d'air faible mais à plus haute température (65-80°C), assurant à la fois une certaine pasteurisation et l'extraction de l'eau jusqu'à 4 % d'eau en une heure (ou même beaucoup moins) (Jourdan, 2006).

#### **6.1.4.4. Broyage**

La spiruline bien séchée est craquante, se détache toute seule du support de séchage et se laisse facilement piler ou broyer au moulin à café en une poudre plus ou moins fine selon le goût de chacun. La spiruline doit contenir moins de 9 % d'eau pour bien se conserver (Jourdan, 2006).

#### **6.1.4.5. Conditionnement**

La spiruline sèche peut se conserver longtemps sans perdre trop de ses qualités à condition d'être stockée en sachets bien remplis et étanches, à l'abri de la lumière, de l'air, et des fortes chaleurs. Des sachets en plastique aluminisés multicouches, thermoscellables, conviennent très bien, il est préférable de faire le vide dans les sachets, dans ce cas le produit peut se conserver 5 ans. Si l'on ne peut pas sceller sous vide, l'absorption de l'oxygène restant dans le sachet convenablement scellé provoquera souvent sa mise en "sous vide" spontanée en quelques jours (Jourdan, 2006).

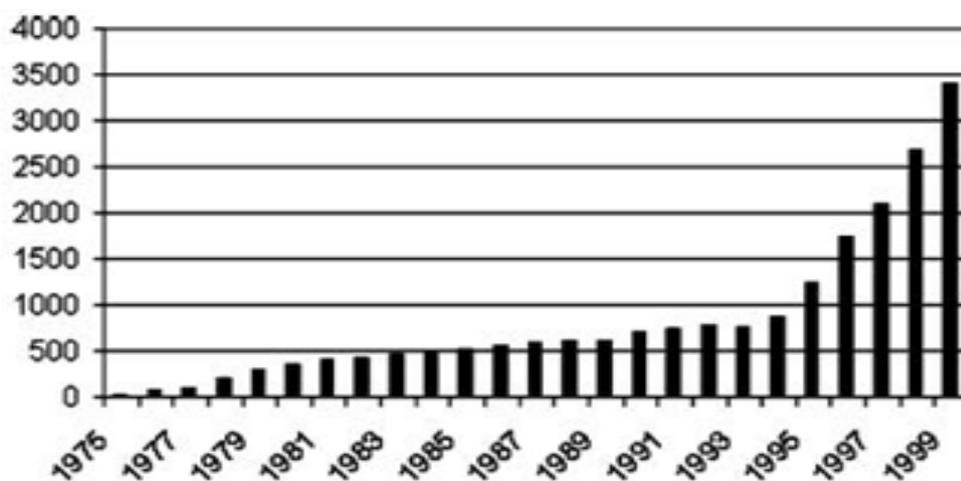
### **6.2. Cultures industrielles**

Les recherches concernant le développement du genre *Arthrospira* en milieu naturel et en milieux contrôlés, qui ont permis l'élaboration de protocoles visant à optimiser la culture des spirulines de l'échelle familiale à l'échelle industrielle. La production industrielle est principalement commercialisée en tant que complément alimentaire "de confort" dans les pays de l'hémisphère Nord. Les installations industrielles de production de spiruline sont pensées par rapport à un ensemble de normes sanitaires et des conditions environnementales très saines : la qualité de l'eau, de l'air et de la nourriture. Les technologies utilisées pour la culture industrielle sont issues de la recherche scientifique, dans le but de maximiser les rendements de production durant toute l'année même dans des climats tempérés qui sont trop froids pour envisager des cultures en plein air, les chercheurs ont étudié, durant ces 20 dernières années, d'autres systèmes, et en particulier la production en photobioréacteurs. De plus, la surface unitaire et la surface totale des bassins de culture sont nettement plus importantes dans le cadre des grosses exploitations industrielles, par rapport aux exploitations artisanales. Concernant l'agitation du milieu de culture, du fait de la forme des bassins industriels, le brassage s'effectue toujours mécaniquement, grâce à de grandes roues à aubes. Le séchage industriel se fait par pulvérisation dans l'air chaud (spray-drying= atomisation), principale méthode actuel (Cruchot, 2008).

### 6.3. Production mondiale et régionale :

1 kilo de spiruline est produit dans le monde toutes les 3 secondes environ, surtout en Chine et aux Etats-Unis. Cela représente une production annuelle de 5.000 tonnes de spiruline ([www.planetoscope.com](http://www.planetoscope.com)). La culture de la micro-algue ne nécessite ni traitement, ni cuisson, n'entraîne aucune pollution donc il est difficile d'obtenir des renseignements permettant de connaître la production mondiale actuelle et les coûts de la Spiruline, une étude réalisée en 2000 par le bureau d'étude Tractebel Consult en association avec le Centre Universitaire de Biotechnologie Algale (CUBIA), Belgique montre que la production mondiale a régulièrement augmenté surtout depuis 1995, de 1400T en 1995 à 3500T en 2000, elle est supérieure à 4000T (*figure 5*). Aujourd'hui. Les Etats-Unis détiennent 50% de la production mondiale. Deux pays seulement en Europe produisent de la spiruline ; il s'agit de la France et de la Hongrie. En Algérie, la production de la Spiruline reste très faible. A notre connaissance il existe quelques fermes de culture artisanale tel que : la ferme de M. Hiri à Tamanrasset et la ferme de M. REDOUANE à Oran.

La notoriété de la spiruline ne cesse de croître et se limite de moins en moins à quelques cercles d'initiés comme c'était encore le cas il y a 10 ans. (Rappel : la ration journalière est de l'ordre de 5 grammes pour un adulte, rien à voir donc avec les volumes des grandes céréales ...), de plus, certains organismes internationaux s'intéressent désormais à la spiruline : la FAO par exemple a édité un rapport en 2008 (« A review on culture, production and use of spirulina as food for humans and feeds for domestic animals and fish ») confirmant les importantes potentialités de la spiruline.



**Figure 5 :** Production mondiale de Spiruline entre 1975 et 1999 en tons (1 tons = 1,016 tonnes) (Pulz *et al.* 2004)

## 7. Bienfaits de la spiruline :

### 7.1. Pour l'être humain :

#### 7.1.1. Bienfaits thérapeutiques :

Les Spirulines sont des cyanobactéries aux multiples propriétés thérapeutiques :

- **anti-oxydante** : elle diminue le stress oxydant (Sguera, 2008).
- **anti-inflammatoire** : l'activité anti-inflammatoire est constatée lors d'une administration *per os* avant l'induction de la réaction inflammatoire (Sguera, 2008).
- **Anticancéreuse** : le calcium-spirulan agit par prévention de l'adhésion et de la migration des cellules tumorales vers la lame basale (Sguera, 2008).
- **Antivirale** : la spiruline bloque l'adsorption et la pénétration virale dans la membrane cellulaire (Sguera, 2008).
- **Effets contre l'hyperlipidémie** : la consommation régulière de spiruline diminue le taux de cholestérol. Le premier rapport sur la réduction du cholestérol sanguin par la Spiruline a été réalisé sur des rats par Devi et Venkataraman en 1983.
- **Effets contre le diabète** : la fraction soluble dans l'eau de la Spiruline a la propriété de diminuer le taux de glucose dans le sérum (Takai *et al.* 1991).
- **Effets contre l'hypertension** : Iwata *et al.* en 1990 ont remarqué une suppression de l'hypertension chez les rats, suite à un apport de Spiruline.
- **Effets contre l'obésité** : Becker *et al.* ont montré en 1986 qu'une supplémentation en Spiruline de 2,8 g 3 fois par jour pendant 4 semaines entraînait une réduction du poids corporel chez les obèses.
- **Immunomodulateur** : différentes études ont démontré que la spiruline était incontestablement un puissant tonifiant du système immunitaire (Qureshi, 1994, 1995, 1996).
- **Effets protecteurs contre les radiations** : d'après Schwartz *et al.* En 1987, les molécules protectrices présentes dans l'extrait de Spiruline agissent comme facteurs stabilisants de l'ADN. On observe alors une diminution des micronucleus induits par les rayons  $\gamma$  (Belay, 2002).
- **Hépatoprotection** : Les actions de la spiruline ou de ses composants sont donc plus préventives que curatives (Sguera, 2008).

### **7.1.2. Bienfaits cosmétiques :**

La spiruline renferme toutes les vitamines et minéraux nécessaires pour avoir une peau, des cheveux et des ongles sains. La vitamine A permet un bronzage plus rapide et plus uniforme, la vitamine B5 permet à la peau de conserver son hydratation et sa souplesse et la vitamine B8, en diminuant l'excrétion de sébum, réduit la principale cause de chute des cheveux (Algosopette, 2017). La phycocyanine est utilisée dans cosmétologie pour la variété de couleurs qu'elle peut donner mélangé avec d'autres composés.

### **7.2. Pour les animaux :**

- **Complément alimentaire :** La spiruline est utilisée comme complément alimentaire chez les animaux de compagnie (chiens, chats, les chevaux, les vaches, les poules, les poissons et les oiseaux) (Henrikson, 1994)
- **Favoriser la croissance et la fertilité :** Des études sur les poissons d'aquarium et la crevette ont montré les effets bénéfiques de *Spirulina platensis* en ce domaine (Kim *et al.* 2006).
- **Renforcer les défenses immunitaires :** La Spiruline est ajoutée aux granulés dans la nourriture des poissons d'élevage, plus souvent soumis à des infections virales ou bactériennes que les poissons sauvages, à cause de l'effet immunostimulant de *Spirulina platensis* (Watanuki *et al.* 2006).
  
- **Augmenter la pigmentation**
  - En aquariophilie pour accentuer la coloration des poissons d'ornement.
  - En aquaculture pour améliorer la pigmentation des crevettes et des poissons
  - En agroalimentaire pour rendre les œufs et la chair de poulet plus attrayants au consommateur par les caroténoïdes qu'elle contient (Henrikson, 1994).
- **Améliorer les performances des animaux :** Elle est utilisée comme additif alimentaire pour les taureaux reproducteurs et les chevaux de course.
- **Elevage larvaire :** Elle est utilisée à hauteur de 1 à 10% de l'alimentation pour augmenter la résistance immunologique des larves (Henrikson, 1994) et utilisée aussi dans la production des proies vivantes comme l'Artémia et les daphnies.

## ***8. Modes de consommation***

### ***8.1. Dans les pays en voie de développement***

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 ces aliments, 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 (Cruchot, 2008).

### ***8.2. Dans les pays développés***

L'industrie alimentaire propose, à l'heure actuelle, de nombreux produits enrichis en spiruline : tagliatelles, soupes instantanées, gelées, pâte à tartiner, barres énergétiques, crèmes glacées, desserts chocolatés, gâteaux, boissons fermentées, yaourts, bonbons et aliments diététiques pour régimes hyperprotéinés. Néanmoins, ces modes de consommation restent rares. La spiruline est plutôt utilisée sous forme de poudre, comprimés, granulés ou gélules en guise de complément alimentaire (Cruchot, 2008).

## Partie 2 Matériel et méthodes

### 1. Choix et intérêt du microorganisme :

La spiruline est un microorganisme exceptionnel, ayant de multiples utilités agroalimentaire, pharmaceutique, écologique et biotechnologique et des effets bénéfiques sur la santé humaine et animale.

### 2. Souche

La souche utiliser dans ce travail est une spiruline de l'espèce *Arthrospira platensis* type M2 (morphologie droite), originaire de Tamanrasset (variété propres à la région), cultivé dans la ferme de M. Hiri. Le volume de la souche reçu été de 1,5 l, et pour éviter l'étouffement de la souche le long du trajet Tamanrasset Bejaia le volume a été partager dans 2 bouteilles : la 1<sup>ère</sup> contenait 1l de souche et 1l d'air et la 2<sup>ème</sup> contenait 500ml de souche et 500ml d'air, avec un apport supplémentaire de CO<sub>2</sub> en soufflant dans les bouteilles chaque 5 à 6 heure.

### 3. Intérêt du travail :

Le but de ce travail est d'essayé de cultiver au laboratoire et observer le comportement de l'algue dans un climat diffèrent de son climat préférentiel.

### 4. Dispositif expérimental :

Pour réaliser ce travail, on a confectionné 2 récipients rectangulaires en verre de dimensions et volumes différents (figure 6) :

- Les dimensions du 1<sup>er</sup> récipient : 40 cm de long, 20 cm de large et 20 cm de hauteur.
- Les dimensions du 2<sup>ème</sup> récipient : 30 cm de long, 15 cm de large et 15 cm de hauteur.

Le 1<sup>er</sup> récipient d'une capacité de 16 litre est utilisé pour l'ensemencement du 1<sup>er</sup> volume de la souche qui est d'un litre. Le 2<sup>ème</sup> récipient d'une capacité de 6,75 litre est utilisé pour l'ensemencement du 2eme volume et qui est de 500ml.



Figure 6 : 2 récipients en verre

#### 4.1. Milieu de culture

Le milieu de culture choisi est celui de M. Hiri. Le choix de ce milieu était due au faite que ce milieu est le plus convenable pour la souche (milieu initial de la souche). Il faut signaler qu'à cause de l'indisponibilité de quelques composants chimiques nous étions contraint de les remplacer par d'autres composants disponibles et qui apportent les mêmes éléments nécessaires à la réalisation du milieu de culture (Tableau 14). Le Natron remplacer par du carbonate de sodium et du bicarbonate de sodium et le Phosphate d'Ammonium  $(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$  remplacer par de l'engrais NPK 3 fois 20 comme source de phosphate, en gardant la même proportion, bien sûr ces substitutions ont été suggérées par M. Hiri.

**Tableau 14** : Composition chimique du milieu de culture Hiri

<i>Milieu HIRI</i>			
<i>Composant</i>	<i>Quantité g/l</i>	<i>Quantité g/5l</i>	<i>Quantité g/2,5l</i>
Natron remplacer par du Carbonate et Bicarbonate de soude	16	80	40
Urée ( $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ )	1	5	2.5
Chlorure de Sodium ( $\text{NaCl}$ )	1	5	2.5
Phosphate d'Ammonium $(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$ remplacer par de l'engrais NPK 3fois 20	0.1	0.5	0.25
Sulfate de Magnésium ( $\text{MgSO}_4$ )	0.1	0.5	0.25
Sulfate de Potassium ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ )	0.5	2.5	1.25
Chlorure de Calcium ( $\text{CaCl}_2, 2\text{H}_2\text{O}$ )	0.1	0.5	0.25
Sulfate de Fer ( $\text{Fe}_2\text{SO}_4$ )	0.01	0.05	0.025

#### 4.2. Ensemencement

L'ensemencement des récipients a été réalisé avec une proportion de 1/5 (1 volume de souche pour 5volume de milieu de culture), de la manière suivante :

1<sup>er</sup> récipient : 1litre de souche pour 5 litre de milieu de culture

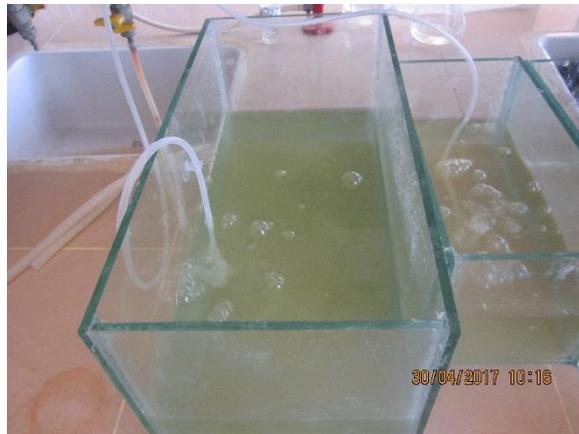
2<sup>eme</sup> récipient : 500 ml de souche pour 2,5 litre de milieu de culture

#### 4.3. Conditions de culture

Les récipients ont été installés sur une pailleasse au laboratoire afin d'assurer la protection des cultures, et d'essayer de créer un système fermé avec une température constante.

### 4.3.1. Agitation

Une agitation était nécessaire pour permettre aux cellules l'accès aux nutriments et à la lumière, elle a été assurée par une bulleuse d'aquarium que nous avons actionné une heure le matin pendant toute la période de l'expérimentation (*figure 7*).



*Figure 7* : agitation des 2 récipients

### 4.3.2. Eclairage

L'éclairage naturel sans ajouter une source lumineuse la nuit.

## 5. Evolution du développement algal :

Le contrôle des cultures des échantillons de Spiruline a été estimée par :

### 5.1. Evolution des paramètres physico-chimiques :

Le suivi est réalisé par des mesures quotidiennes de la température et du pH. Ces paramètres sont mesurés à l'aide d'un pH-mètre de paillasse muni d'une sonde pour la mesure de la température

### 5.2. Etude de caractérisation de la Spiruline :

Elle a été réalisée par le biais de :

- **Etude de la forme et la couleur de la Spiruline** : la couleur et la forme peuvent varier en fonction du caractère physique et chimique du milieu. L'observation des échantillons a été réalisée sous un microscope optique.
- **Mesure de l'absorbance** : on a mesuré l'absorbance quotidiennement pour avoir une estimation de la concentration de la biomasse. Elle consiste en une lecture, à l'aide d'un spectrophotomètre, de la densité optique de la culture à une longueur d'onde de 550 nm.

- **Comptage des filaments** : des dénombrements ont été faits sur des préparations extemporanées des échantillons des cultures de 0,1ml pour estimer la densité algale dans la culture. Le résultat est donné en nombre de filaments de Spiruline contenu par litre de culture.

**6. Récolte :**

La spiruline cultivée a été récoltée après un mois de culture soit le 25/05/2017. Filtrée, essorée et séchée à l'air libre, la biomasse obtenue est pesée à l'aide d'une balance électronique de précision (figure 8 (a), (a'), (b) et (c)).



**Figure 8** : Filtration (a) et (a'), essorage (b), séchage (c).

## Partie 3 : Résultats et Discussion

### 1. Etudes de la culture

#### 1.1. Evolution des paramètres physico-chimiques

La température et le pH des cultures de Spiruline ont été mesurés depuis sa mise en culture. Les valeurs enregistrées sont récapitulées dans le tableau suivant (*Tableau 15*):

**Tableau 15** : Evolution de la température et du pH des cultures de Spiruline

Date	T° ambiante	1 <sup>er</sup> récipient		2 <sup>eme</sup> récipient	
		T°	pH	T°	pH
25/04/2017	22°C	21,3°C	11,06	20,4°C	8,21
26/04/2017	23°C	21,3°C	10,98	21,7°C	8,50
27/04/2017	27°C	23,8°C	10,70	23,1°C	9,29
30/04/2017	21°C	20,1°C	10,66	19,9°C	9,53
02/05/2017	20°C	20,4°C	10,44	20,0°C	9,44
03/05/2017	21°C	20,2°C	10,45	20,4°C	9,48
07/05/2017	22°C	21,8°C	11,33	21,5°C	10,6
08/05/2017	23°C	21,6°C	11,51	21,6°C	10,79
09/05/2017	24°C	22,2°C	9,61	21,1°C	9,12
10/05/2017	24°C	22,3°C	9,61	21,8°C	9,16
11/05/2017	25°C	22,1°C	9,54	21,7°C	9,1
14/05/2017	23°C	21,7°C	10,05	21,2°C	9,7
15/05/2017	23°C	22,2°C	9,34	22°C	9,11
16/05/2017	24°C	22,0°C	9,24	21,6°C	9,08

#### 1.1.1. Température

La température moyenne ambiante était de 23 °C pendant la durée de l'expérimentation (*Figure 9*). La température moyenne du 1<sup>er</sup> récipient était de 21,6°C, et celle du 2<sup>ème</sup> récipient était de 21,2°C. Elle est quasiment identique entre les deux bacs et présente une différence de 2°C avec la température ambiante (*Tableau 15*).

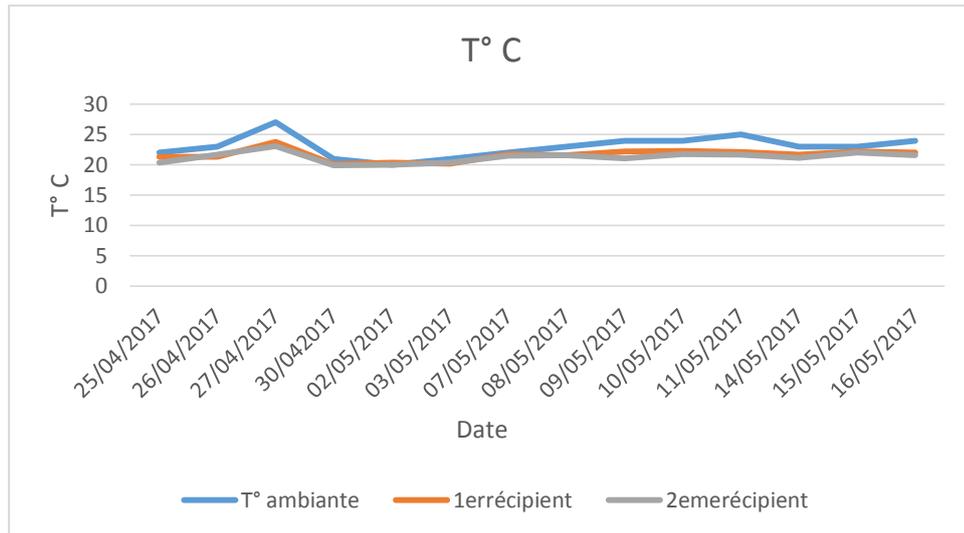


Figure 9 : Evolution de la température dans les cultures de la Spiruline

### 1.1.2. pH :

La valeur moyenne du pH dans le 1<sup>er</sup> récipient était de 10,32 et de 9,36 pour le 2<sup>ème</sup> récipient (Figure 10). Le pH est resté presque constant pour les 2 récipients, avec des pics au 14<sup>ème</sup> jour de culture (11,51 pour le 1<sup>er</sup> récipient et 10,79) comme indiqué dans le tableau (Tableau 15).

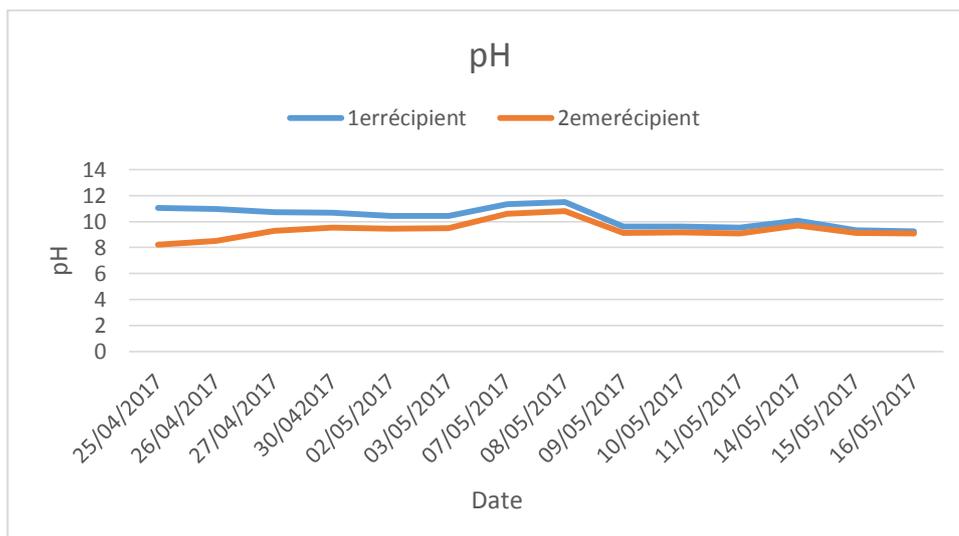


Figure 10 : Evolution du pH dans les cultures de Spiruline

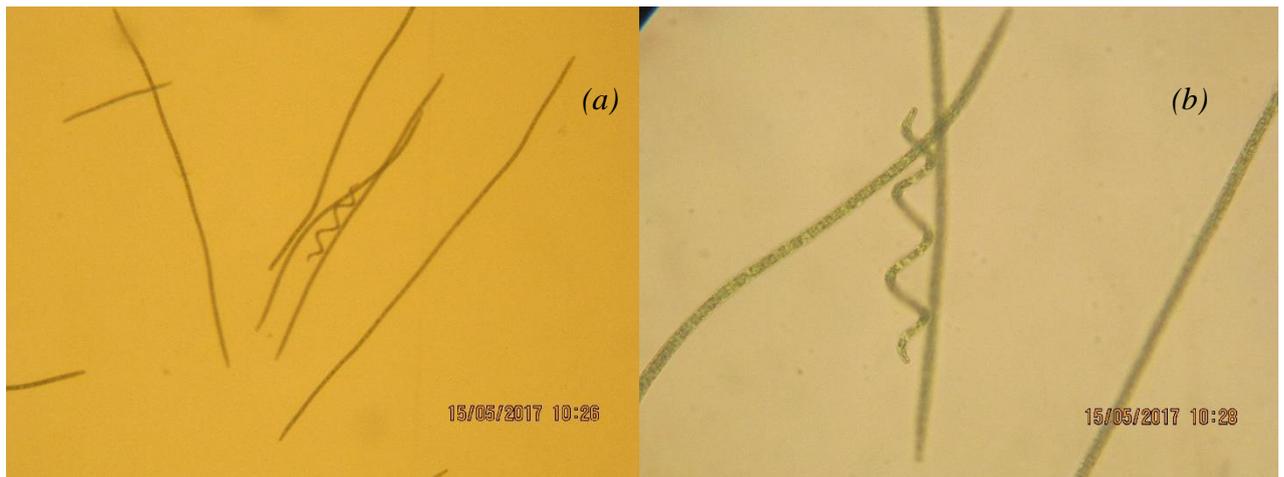
## 1.2. Caractérisations de la spiruline

### 1.2.1. Etude morphologique et changement de couleur

Une observation périodique au microscope optique nous a permis de surveiller la morphologie de la Spiruline tout le long de la période de culture. Les figures ci-dessous nous montrent les différentes morphologies observées (*figure 11*), (*figure 12 (a)*, (*b*)).



**Figure 11** : filament en forme ondulée 1<sup>er</sup> récipient observé au microscope optique grossissement 10.



**Figure 12** : filaments de forme droite et spiralée 1<sup>er</sup> récipient observé au microscope optique grossissement 10(a) et grossissement 40 (b).

### 1.3. Evolution des paramètres biométrique

#### 1.3.1. Evolution de la biomasse

Les valeurs des densités optiques enregistrées sont plus ou moins identiques pour les 2 récipients (entre 0,102 et 0,120) jusqu'au 9<sup>ème</sup> jour de culture ce qui explique un début de développement de la spiruline comme le montre le tableau suivant (*Tableau 16*):

**Tableau 16** : Evolutions des densités optiques des cultures de Spiruline

<i>Date</i>	<i>1<sup>er</sup> récipient</i>	<i>2<sup>ème</sup> récipient</i>
<b>25/04/2017(ensemencement)</b>	/	/
<b>26/04/2017(2<sup>ème</sup> jour)</b>	0,102	0,110
<b>27/04/2017(3<sup>ème</sup> jour)</b>	0	0
<b>30/04/2017(6<sup>ème</sup> jour)</b>	0,109	0,107
<b>02/05/2017(8<sup>ème</sup> jour)</b>	0,120	0,107
<b>03/05/2017(9<sup>ème</sup> jour)</b>	0,112	0,098
<b>07/05/2017(13<sup>ème</sup> jour)</b>	0,252	0,122
<b>08/05/2017(14<sup>ème</sup> jour)</b>	0,216	0,311
<b>09/05/2017(15<sup>ème</sup> jour)</b>	0,549	0,284
<b>10/05/2017 (16<sup>ème</sup> jour)</b>	0,610	0,221
<b>11/05/2017 (17<sup>ème</sup> jour)</b>	0,674	0,139
<b>14/05/2017 (20<sup>ème</sup> jour)</b>	1,012	0,149
<b>15/05/2017 (21<sup>ème</sup> jour)</b>	1,010	0,240
<b>16/05/2017 (22<sup>ème</sup> jour)</b>	1,045	0,228

Au-delà du 13<sup>ème</sup> jour, les valeurs augmentent dans les 2 récipients traduisant un développement intense. A partir du 14<sup>ème</sup> jour et jusqu'au 22<sup>ème</sup> jour, la Spiruline a montré une croissance importante et continue dans le 1<sup>er</sup> récipient traduite par des valeurs de densité optique élevées (de 0,252 à 1,045), le milieu de culture était de couleur vert foncé. Quant au 2<sup>ème</sup> récipient, le pic des valeurs était atteint le 14<sup>ème</sup> jour (0,311) correspondant à une croissance importante suivie d'un ralentissement de la croissance et une décroissance des valeurs. Une légère augmentation a été observée à la fin de la culture (*Figure 13*).

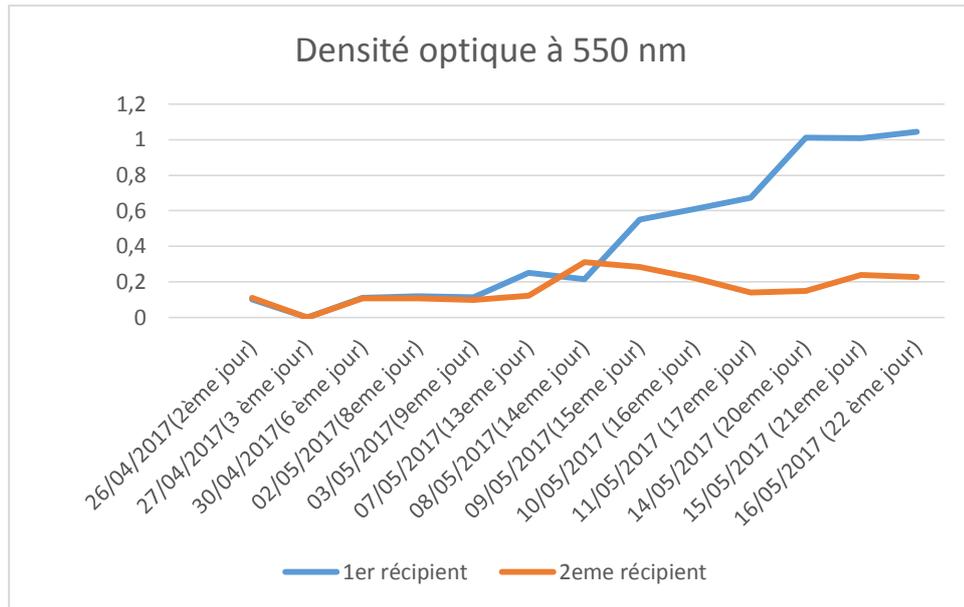


Figure 13 : courbe des valeurs de l'absorbance de la spiruline

## 2. Etude de la croissance de la Spiruline dans les cultures :

Cinq comptages ont été réalisés pour les 2 récipients à 5 jours d'intervalle pour permettre aux algues de se multiplier. Les résultats sont rassemblés dans un tableau (Tableau 17) (figure 14).

Tableau 17 : Abondance des filaments de la Spiruline cultivée

Date	Nombre de filaments 1 <sup>er</sup> bac (1 litre de culture)	Nombre de filament 2 <sup>è</sup> me bac (1 litre de culture)
30/04/2017	870 000	216 000
03/05/2017	2 230 000	3 040 000
08/05/2017	∞	7 570 000
16/05/2017	∞	19 200 000
23/05/2017	∞	100 000

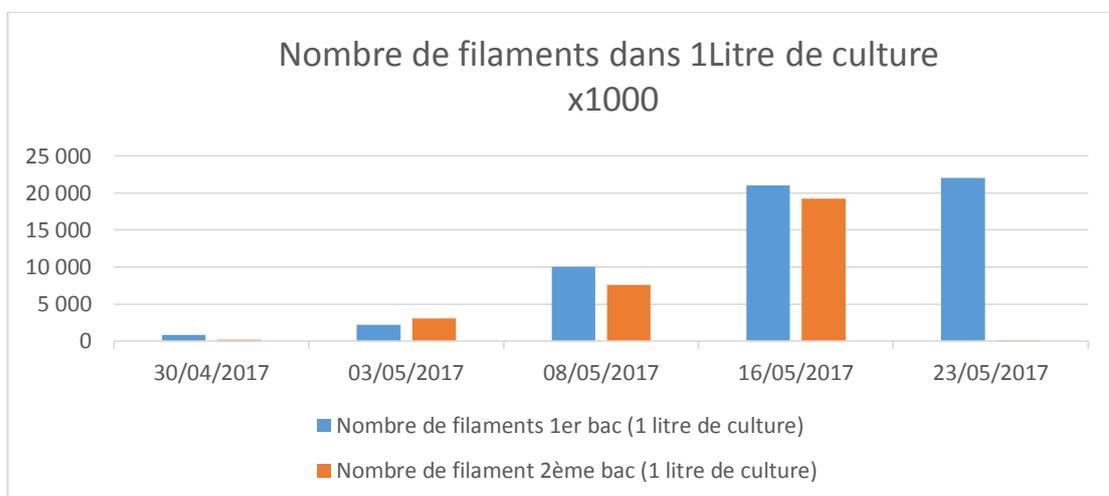
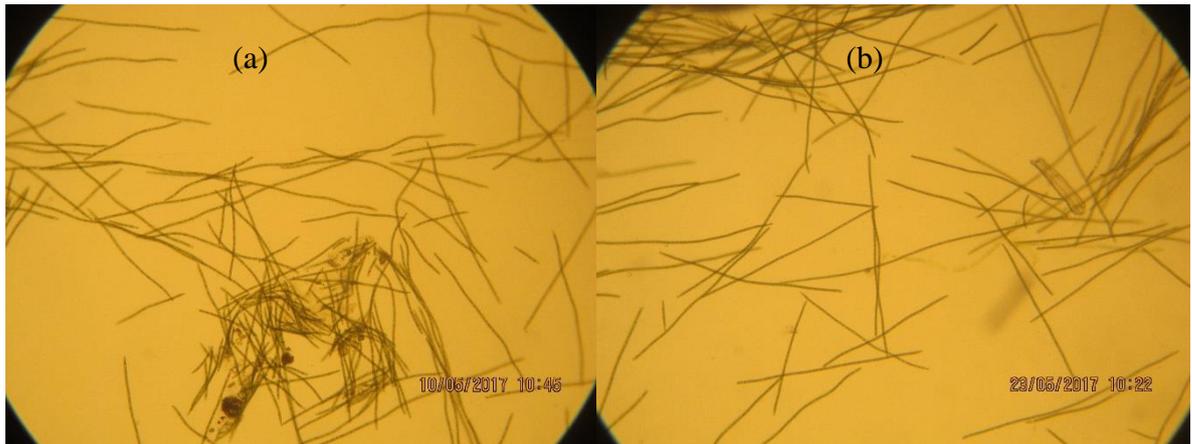


Figure 14 : Abondance des filaments de la Spiruline dans les deux bacs de culture



**Figure 15 :** enchevêtrement des filaments de le Spiruline dans le 1<sup>er</sup> récipient 10/05/2017 (a) et 23/05/2017 (b).

### **2.1. Etude de la croissance de la Spiruline du 1<sup>er</sup> récipient :**

Une observation directe montre que la culture est de couleur vert (*figure 17 (a)*), avec une croissance assez lente (*figure 14*), même si l'alcalinité du milieu est favorable (*figure 10*). Cette lente croissance est due principalement à la température du milieu. En effet la température optimale pour une multiplication rapide de la spiruline varie entre 37° à 40° et à 20° la croissance est pratiquement stoppée (Jourdan, 2006). Or les valeurs mesurés été largement inférieures à 37°C (*figure 9*). La croissance lente et un système d'agitation non adéquat ont fait que la récolte reste relativement faible.

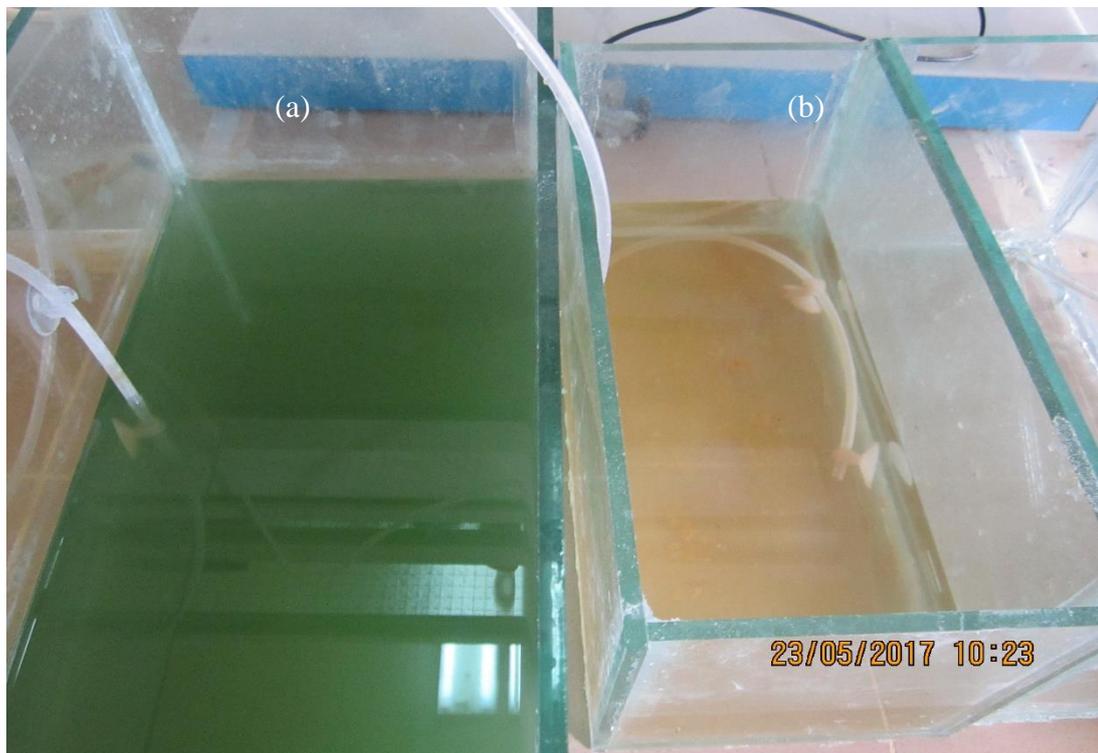
### **2.2. Etude de la croissance de la Spiruline du 2<sup>ème</sup> récipient**

Pour le 2<sup>ème</sup> récipient une croissance du nombre de filaments a été observée lors des 4 premiers comptages et plus particulièrement après 22 jours de l'ensemencement suivie d'une diminution brutale atteignant à peine une centaine de filaments par ml (*Tableau 17*). Cette faible densité a été accompagnée d'une dépigmentation des filaments déjà observée lors du 4<sup>ème</sup> comptage (*figure 16*).

En parallèle, une observation directe à l'œil nu une décoloration du milieu de culture (*figure 17 (b)*), et une croissance quasi nulle à la fin de l'expérimentation. Ceci est dû essentiellement à la température trop basse (*figure 9*) et éventuellement la contamination du milieu par des microorganismes qui ont dû épuiser les éléments nutritifs du milieu de culture et entraînant un début de dégénérescence des algues mises en culture.



**Figure 16** : Dépigmentation des trichomes de la Spiruline dans le 2<sup>ème</sup> récipient observé au microscope grossissement 40



**Figure 17** : Couleurs de la culture 1<sup>ère</sup> récipient (a), 2<sup>ème</sup> récipient (b)

### 3. Récolte

Une récolte a pu être réalisée à la fin de la période d'expérimentation c'est à dire après un mois de culture. La récolte a été faite que pour le 1<sup>er</sup> récipient car le 2<sup>ème</sup> n'avait presque plus de filaments. Le poids de la biomasse obtenue est de 0,63 g.

## ***Conclusion générale :***

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 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, écologique et en fin phylogénétique). 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 2 modes : la première est artisanale et dépend de plusieurs facteurs (climatiques et environnementaux). La deuxième 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.

Nous avons réalisé une culture au laboratoire, les résultats obtenus démontrent que la température est un facteur très important dans le développement de la spiruline même si le milieu est favorable et correctement alcalin ce qui s'est traduit par une faible production de la biomasse.

Compte tenu de toutes ces données, notre travail reste préliminaire, il paraît d'une grande utilité de poursuivre la présente étude tout en élargissant le champ des expérimentations et d'approfondir les recherches scientifiques et technologiques, dans le futur. Nous envisageons d'entreprendre les différentes activités de recherche suivantes :

- Identification génétique, taxonomique, phylogénétique et caractérisation biochimique de la souche algérienne (la souche de la région de Tamanrasset).
- L'utilisation de la spiruline cultivée dans l'aquaculture et l'aliment de bétail.
- L'utilisation de la spiruline en agriculture "Biofertilisant" et engrais naturel.

## ***Références Bibliographiques***

- AFAA, Association française pour l'algologie appliquée. (1982).** Actes du premier symposium sur la spiruline *Spirulina Platensis* (Gom). Geitler de l'AFAA.
- Antenna Technology (2002)** Livret pédagogique Accompagnement du film : « La spiruline contre la malnutrition » (Madurai - Inde).
- Ballinger AB, Clark ML. (1994).** L-phenylalanine releases cholecystokinin (CCK) and is associated with reduced food intake in humans: evidence for a physiological role of CCK in control of eating. *Metabolism*; 43:735–738.
- Balloni W, Tomaselli L, Giovannetti L, Margheri MC (1980)** Biologia fondamentale del genere *Spirulina*. In: Materassi R (ed) *Prospettive della Coltura Massiva di Spirulina in Italia*. CNR Rome, pp 49–85
- Ballot, A. (2004).** Cyanobacteria in Kenyan Rift Valley lakes – A biological and toxicological study. Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades des Doktors der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.) eingereicht im Fachbereich Biologie, Chemie, Pharmazie der Freien Universität Berlin.
- Beadle L. C. (1943).** An ecological survey of some inland saline waters of Algeria. p. 44.
- Becker, et al. (1986).** Clinical and biochemical evaluations of spirulina with regard to its application in the treatment of obesity. *Inst. Chem. Pflanz in Nutrition Reports Int'l*, Vol. 33, No. 4, pg 565. Germany.
- Belay A, Ota Y. (1996).** Production of high quality spirulina at Earthrise Farms. In: *Proc. of Second Asia Pacific Conférence on Algal Biotech*. Univ. of Malaysia USA.
- Belay, A. (1997).** Mass culture of *Spirulina platensis* - The Earthrise farms Experience In "*Spirulina platensis* (*Arthrospira*)" Ed. Avigad Vonshak, Taylor & Francis, Londre, pp.131-158.
- Belay A. (2002).** The potentiel application of *Spirulina* (*Arthrospira*) as a nutritional and therapeutic supplement in health management. *The Journal of the American Nutraceutical.*; 5 (2): p. 26-49.
- Belay A, (2007).** *Spirulina* (*Arthrospira*): production and quality assurance in *Spirulina*. In Gershwin ME et Belay A. *Human Nutrition and Health*. Taylor et francis.
- Bories G. et Tulliez J. (1975).** Détermination du 3,4-benzopyrène dans les algues spirulines produites et traitées suivant différents procédés *Ann. Nutr. Aliment.* 29, 573-575.

- 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*; 29 : 577-87.
- Bujard E., Braco U., Mauron J., Mottu F., Nabholz A., Wuhrmann J.J. et Clement G. (1970).** Composition and nutritive value of blue-green algae (spirulina) and their possible use in food formulations. 3rd International Congress of Food Science & Technology. Washington.
- Compere P et Leonard J. (1967).** *Spirulina platensis* (Gom.) Geitler, algue bleue de grande valeur alimentaire par sa richesse en proteines; **37 (1):** p. Suppl. 23 p.
- Castenholz R.W., Rippka R., Herdman M. and Wilmotte A. (2001).** Form-genus I. *Arthrospira* Stizenberger 1852. D. R. Boone & R.W. Castenholz, eds. *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology*. New York, USA: Springer; **1.** p. 542-543.
- Ciferri, O. (1983).** *Spirulina*, the Edible Microorganism. *Microbial. Rev.* Vol. 47:551-578.
- Chamorro-Cevallos, (1980).** Toxicologic Research on the Alga *Spirulina*. United Nations Organisation for Industrial Development; 24 oct.
- Charpy L, (2008).** Colloque International « la Spiruline et le développement », formation et transfert de thechnologie, en matière de culture de Spiruline: 28 - 29 et 30 avril 2008. Toliara - SUD-OUEST MADAGASCAR: 8, 9, 89, 91, 131-134.
- Cheevadhanarak et al. (2012).** Draft genome sequence of *Arthrospira platensis* C1 (PCC9438). *Standards in Genomic Sciences* **6:**43-53.
- Clément, G., Giddey, C. et Menzi, R. (1967).** Amino Acid Composition and Nutritive Value of the Alga *Spirulina maxima*. *J. Sci. Fd. Agric.* Vol. 18: 497-501.
- Cohen Z. (1997).** Chemicals from *Spirulina* in "*Spirulina platensis*: Physiology, cell-biology and biotechnology". Ed. A. Vonshak, Taylor & Francis Ltd.
- Cruchot H, (2008).** La Spiruline, Bilan et Perspective. Thèse docteur en pharmacie. Faculté de médecine et de pharmacie de Besançon. Université de France-Comite.
- Delpeuch F., Joseph A. et Cavelier C. (1975).** Consommation alimentaire et apport nutritionnel des algues bleues (*Oscillatoris platensis*) chez quelques populations du Kanem (Tchad). *Annales de la Nutrition et de l'Alimentation*; **29:** p. 497-515.
- Desikachary, T.V. (1959).** *Cyanophyta*. Indian Council of Agriculture Research, Monographs on Algae. p. 686. New Delhi, India.
- Devi M. A., Venkataraman L.V. (1983).** Hypocholesterolemic effect of blue-green algae spirulina in albino rats in *Nutrition Reports Int'l*, 28:519-530. India.

- Doumenge F, Durand-Chastel H, Toulemont A. (1993).** Spiruline, algue de vie/ Spirulina, algae of life. Bulletin de l'Institut Océanographique de Monaco ; numéro spécial 12. Monaco : Musée Océanographique.
- Falquet, J. (1996).** Spiruline : aspects nutritionnels. Antenna Technologie. Vol. 29, r. de Neuchâtel CH-1201 Genève, Suisse. P. 1-16.
- Falquet J. et Hurni J-P. (2006).** Spiruline : aspects nutritionnels. Antenna Technologies
- Farrar, W.V. (1966).** Techuitlatl, a Glimpse of Aztec Food Technology. Nature. N° 5047.
- Fox, R. D. (1999).** La spiruline : technique, pratique et promesse. Edisud: 246. ISBN 2-7449-0100-8.
- Girardin-Andréani C. (2005).** Spiruline : système sanguin, système immunitaire et cancer. Phytothérapie; 4: p. 158-161.
- Geitler, L. (1932).** Cyanophyceae. In: Rabenhorst's Kryptogamenflora von Deutschland, Österreich und der Schweiz, Leipzig, Akad. Verslagsges. 1932. Reprinted 1971, New York, Johnson. p. 1-1196.
- Guglielmi, G., Rippka, R. et Tandeau Demarsac, N. (1993).** Main properties that justify the different taxonomic position of Spirulina spp. and Arthrospira spp. Among cyanobacteria. Bull. Inst. Oceanogr. Vol. 12: 13-23.
- Hindak, F. (1985).** Morphology of trichomes in Spirulina fusiformis Vorochnin from Lake Bogoria. Kenya. Arch. Hydrobiol./Suppl. Vol. 71: 201-218.
- Henrikson, (1994).** Earth food Spirulina, How this remarkable blue-green algae can transform your health and our planet. Ronore Enterprises Inc., U.S.A.
- Iwata, et al. (1990).** Effects of spirulina on plasma lipoprotein lipase activity in rats in Journal Nutr. Sci. Vitaminol, 36:165-171. Japan.
- Jarisoa, T. (2005).** Adaptation de la spiruline du sud de madagascar a la culture en eau de mer. Mise au point de structures de production à l'échelle villageoise. p. 188.
- Jourdan, (2006).** Manuel de culture artisanale de spiruline. Edition 2006, Révision mars 2013
- Kim. C.J, et al. (2006).** Effet of Spirulina platensis and probiotics as feed additives on growth of shrimp Fenneropenaeus chinensis. Journal of microbiology and biotechnology.
- König C.** Les algues : première lignée végétale. Disponible sur : <http://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/botanique-algues-vegetaux-aquatiques-523/> publié en 2005 modifié en 2015.
- Lee J-B., Srisomporn P., Hayashi K., Tnaka T., Sankawa U. (2001).** Effects of Structural

Modification of Calcium Spirulan, a Sulfated Polysaccharide from *Spirulina Platensis*, on Antiviral Activity. *Chemical & Pharmaceutical Bulletin*; **49 (1)**: p. 108-110.

**Léonard, J. (1968)**. Discovery, ecology and nutritional utilization of *Spirulina platensis*. Communication à la réunion du Swedish. Council for Applied Research, Stockholm, 11.

**Levi, Y., Harvey, M. et Cervantès, P. (2006)**. L'évaluation des risques liés à la présence de cyanobactéries et de leurs toxines dans les eaux destinées à l'alimentation, à la baignade et autres activités récréatives. Afseet agence française de sécurité sanitaire et de l'environnement. p. 1-231.

**Litvaitis, M. K. (2002)**. A molecular test of cyanobacterial phylogeny: inferences from constraint analyses. Department of Zoology and Center for Marine Biology University of New Hampshire Durham U.S.A.

**Manen, J.F. et Falquet, J. (2002)**. The *cpcB-cpcA* locus as a tool for the genetic characterization of the genus *Arthrospira* (Cyanobacteria): evidence for horizontal transfer. *Int. J. System. Evol. Microbiol.* Vol. 52.

**Muhling, M., Somerfield, Harris, N., Belay, A. et Whitton, B. (2006)**. Phenotypic analysis of *Arthrospira* (*Spirulina*) strains (cyanobacteria). *Phycologia*. Vol. 45 (1): 95-104. (2006)

**Nelissen B., Wilmotte A., Neefs J.M. and De Wachter R. (1994)**. Phylogenetic relationships among filamentous helical cyanobacteria investigated on the basis of 16S ribosomal RNA gene sequence analysis. *Systematic and Applied Microbiology*; **17**: p. 206-210.

**Ogilvie M. & C., (1986)**. *Flamingos* Alan Sutton, Gloucester, England.

**Paniagua-michel J., Dujardin E. et Sironval C. (1993)**. Le Tecuitlal, concentré de spirulines source de protéines comestibles chez les Aztèques. *Cahiers de l'Agriculture*; **2**: p. 283-287.

**Pulz O., Gross W. (2004)**. Valuable products from biotechnology of microalgae. *Applied Microbiology and Biotechnology*.

**Qureshi M. (1994)**. Immune enhancement potential of spirulina in chickens. *Journal of Poultry Science*; **73**: p. 46.

**Qureshi M.A., Ali R.A., Hunter R.L. (1995)**. Immunomodulatory effects of *Spirulina platensis* Supplementation in chickens. *Poultry Disease Conference*; **44**: p. 171-121.

**Qureshi M.A. (1996)**. *Spirulina platensis* exposures enhances macrophage phagocytic function in cats. *Immunopharmacology and Immunotoxicology*. 1996; **18**: p. 457-463.

**Roger P.A. (2006)** Les cyanobactéries : définition. Disponible sur : [http://pagesperso-orange.fr/cyanobacteries/pages/Introduction/definition.htm\\_2006](http://pagesperso-orange.fr/cyanobacteries/pages/Introduction/definition.htm_2006)

- Sall, M.G., Dankoko, B., Badiane, M., Ehua, E. et Kuakuwi, N. (1999).** La spiruline : une source alimentaire à promouvoir. *Médecine d'Afrique Noire*. Vol. 46 (3): 140-141.
- Santillan, C. (1974).** Cultivation of the Spirulina for Human Consumption and for Animal Feed. International Congress of Food Science and Technology. Madrid (Spain).
- Sautier C. and Tremolieres J. (1976).** Food value of spirulina in humans. *Annales de la Nutrition et de l'Alimentation*; **30**: p. 517-534.
- Scheldeman, P., Baurain, D., Bouhy, R., Scott, M., Muhling, M., Whitton, B.A., Belay, 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*. Vol. 172: 213-222.
- Schwartz, J. et Shklar, G. (1987).** Regression of experimental hamster cancer by beta-carotene and algae extracts. *J. Oral. Maxillofac. Surg.* Vol. 45(6).
- Sguera, S (2008).** Spirulina platensis et ses constituants intérêts nutritionnels et activités thérapeutiques. Thèse docteur en pharmacie. Faculté de pharmacie. Université de France-Comite.
- Takai et al. (1991).** Effect of water soluble and water insoluble fractions of spirulina over serum lipids and glucose resistance of rats in *J. Japan Soc. Nutr. Food Science*, 44:273-277.
- Tomasselli, L. (1997):** Morphology, ultrastructure and taxonomy of Arthrospira (Spirulina) maxima and Arthrospira (Spirulina) platensis. In: VONSHAK, A. (Ed.), *Spirulina platensis (Arthrospira). Physiology, Cell-Biology and Biotechnology*. p. 1-17. Taylor and Francis, London.
- Trzebiatowska J, Lipok J, Zastawniak K, Mlynarz P and P. Kafarski (2004)** Glyphosate degradation by Spirulina sp.
- Tulliez J, Boreis G, Février C, Boudène C. (1975).** Les hydrocarbures des algues spirulines : nature, étude du devenir de l'heptadécane chez le rat et le porc. *Ann.Nutr.Aliment*; 29: 563-71.
- Vicat J. P., Doumnang Mbaigane J. C., Dingamtar Ndjadode N., Guideal R., Bellion Y. (2016).** Teneurs en éléments majeurs et traces de spirulines (Arthrospira platensis) originaires de France, Madagascar, Inde, Costa Rica et Equateur. *Algerian Journal of Natural Products* 4:2 292-298.
- Von der wied, D et al. (2011)** Potential of Spirulina Platensis as a Nutritional Supplement in Malnourished HIV-Infected Adults in Sub-Saharan Africa: A Randomised, Single-Blind Study. Department of Physiological Sciences and Biochemistry, Faculty of Medicine and Biomedical Sciences, University of Yaounde 1, Cameroon.

**Watanuki. H, Ota. K, et al. (2006).** Immunostimulant effects of dietary *Spirulina platensis* on carp, *Cyprinus carpio*. *Aquaculture* 258.p 157-163

**Yang, Lee EH, Kim HM. (1997).** *Spirulina platensis* inhibits anaphylactic réaction. *Life Sci*; 61 (13): 1237-44.

**Zarrouk C., (1966),** Contribution à l'étude d'une cyanophycée. Influence de divers facteurs physiques et chimiques sur la croissance et la photosynthèse de *Spirulina maxima*. Thèse de doctorat, Paris.

### **Webographie:**

**Algosopnette, (2017)** LA PEAU, LES CHEVEUX, LES ONGLES avec Spiruline.  
<http://www.algosopnette.com/association/spiruline-redactionnel-30.html>

**Cyanobactéries (algues bleues)** caractéristiques utiles pour l'identification  
<ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/009/x0169f/X0169F05.pdf>

**Planetoscope. (2017)** La spiruline dans le monde

<https://www.planetoscope.com/Autre/1027-production-mondiale-de-spiruline.html>

### **Résumé :**

*Arthrospira platensis*, plus couramment appelée spiruline, est une cyanobactérie filamenteuse qui prolifère facilement dans les lacs alcalins et eaux saumâtres du monde entier. Grâce à ses qualités nutritionnelles complètes (jusqu'à 70% en masse), elle est utilisée dans le cadre d'essais de réhabilitation nutritionnelle dans les pays où sévit la malnutrition. Dans les pays développés, son véritable essor n'est apparu qu'à partir des années 90 lors de la découverte de molécules actives comme la phycocyanine ou le calcium-spirulan. De nombreuses études ont démontrées des activités antioxydants, anti-inflammatoires, anticancéreuses, antivirales ou encore des capacités hépatoprotectrices ou modulatrices de l'immunité. La Spiruline est cultivée artisanalement dans les pays en voie de développement et 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. Les nombreuses qualités de cette algue font sans doute un aliment fonctionnel qui intéressera les industries agro-alimentaires, cosmétiques et pharmaceutiques. En raison de ses qualités nutritionnelles complètes et ses vertus thérapeutiques, l'intérêt pour la spiruline et plus généralement pour les microalgues croîtra rapidement dans les années à venir.

**Mots-clés:** Spiruline, Spirulina, *Arthrospira platensis*, Culture de spiruline, présentation spiruline, mode de culture

### **Abstract**

*Arthrospira platensis*, more commonly known as spirulina, is a filamentous cyanobacterium that proliferates easily in alkaline lakes and brackish waters around the world. Thanks to its complete nutritional qualities (up to 70% by mass), spirulina is used in nutritional rehabilitation trials in countries where malnutrition is prevalent. In the developed countries, its true rise did not appear until the 1990s when active molecules such as phycocyanin or calcium-spirulan were discovered. Several studies have shown that spirulina possesses antioxidant, anti-inflammatory, anti-cancer, antiviral, hepatoprotective or immunity modulating activities. It is cultivated artisanally in developing countries and is intensively cultivated in developed countries. Modern industrial farms of several hectares exploit this cyanobacterium and market many food supplements. The many qualities no doubt make spirulina a functional food that will interest the agro-food, cosmetics and pharmaceutical industries. Due to its complete nutritional qualities and its therapeutic virtues, interest in spirulina and microalgae will grow rapidly in the years to come.

**Keywords:** Spirulina, *Arthrospira platensis*, Spirulina culture, spirulina presentation, culture mode