

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE D'EL-OUED
FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE
DEPARTEMENT DE BIOLOGIE CELLULAIRE ET MOLECULAIRE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de Licence Académique

Filière : Biochimie

Spécialité : Biochimie.

THEME

**Intérêt techno fonctionnel de différentes
fractions biochimiques de la spiruline.**

Présenté par :

GASMI Nadia

KHELLOU Somia

LAOUTI Aicha

Promoteur :

M. LAICHE Ammar Touhami

Année universitaire 2012/2013.

Remerciement

Nous tenons à remercier avant tout Dieu tout puissant qui nous a donné la volonté, la force, la santé et la patience pour élaborer notre travail.

*Nous remercions en particulier notre encadreur **MONSIEUR LAICHE AMMAR TOUHAMI** qui nous a aidé et conseillé durant cette année.*

*Nous remercions également **M^{me} CHENNA ADALA** pour sa contribution afin que nous réussissions .*

Ainsi nous tenons à exprimer nos remerciements à tous les enseignants de département de biologie cellulaire et moléculaire .

Nos remerciements vont aussi à tous les membres de jury qui ont accepté de jury notre travail.

*Nous adressons aussi nos vifs remerciements à notre doyen monsieur **BEN HAWA BOUBAKER** .*

En fin, nous tenons à remercier nos familles et nos amis, qui ont toujours été près de nous dans les moments difficiles.

SOMMAIRE

Introduction générale	
Chapitre I : Généralités sur les algues	
I.1. Généralités sur les algues.....	11
I.2. Généralités sur les cyanobactéries.....	12
I.2.1. Cytologie	12
I.2.1.1. Aspects cellulaires.....	12
I.2.1.2. Paroi cellulaire.....	13
I.2.1.3. Pigments.....	14
I.2.2. Mode nutritionnelle.....	14
I.2.3. Reproduction.....	15
I.2.4. Mobilité.....	15
I.2.5. Ecologie.....	15
I.2.6. Classification.....	16
I.3. La spiruline.....	18
I.3.1. Historique de la spiruline.....	19
I.3.2. Classification	20
I.3.3. Morphologie.....	20
I.3.4. Bio-Ecologie	21
I.3.5. Les gisements naturels dans le monde.....	22
Chapitre II : La composition chimique et biochimique et la valeur nutritionnelle de la spiruline	
II.1. Composition	25
II.2. La valeur nutritionnelle de la spiruline	29
II.2.1. Les Protéines	29
II.2.1.1. Quantités, composition.....	29
II.2.1.2. Qualité.....	30
II.2.1.3. Utilisation protéique nette	30
II.2.2. Les lipides	30
II.2.2.1. Les lipides totaux	30
II.2.3. Les glucides	31
II.2.4. Les acides nucléiques	31
II.2.5. Les vitamines.....	32

II.2.5.1. Vitamines hydrosolubles.....	32
II.2.5.2. Vitamines liposolubles	33
II.2.6. Les minéraux et oligo-éléments.....	33
II.2.6.1. Calcium.....	34
II.2.6 .2. Magnésium.....	35
II.2.6 .3. Phosphore	35
II.2.6. 4. Fer.....	35
II.2.6 .5. Zinc.....	36
II.2.6.6. Sélénium.....	36
II.2.6.7. Les pigments	37
II.2.6. 8. Métaux.....	37
Chapitre III : Conditions de culture de la spiruline et domaines d'utilisation	
III.1. La culture de la spiruline.....	38
III.1 .1.Bases techniques de la production	38
III.1.2. Facteurs essentiels de la culture	39
III.1.2.1. Facteurs climatiques.....	39
III.1.2.1.1. Température	39
III.1.2.1.2. Pluviométrie	39
III.1.2.2. Autres facteurs	40
III.1.2.2.1. Lumière.....	40
III.1.2.2.2. Salinité	40
III.1. 2.2.3. pH	41
III.1.3. Bassins de culture	41
III.1.4 . Milieu de culture	43
III.1.5. Ensemencement	43
III.1.5.1. choix de la souche.....	43
III.1.5.2. Mesure de la concentration d'une culture de spiruline	44
III.2. Domaines d'utilisation.....	46
III.2.1 . Utilisations sanitaires de la spiruline	47
III.2.1.1. Cholestérolémie.....	47
III.2.1.2. Cancer	47
III.2.1.3. Anémie	48
III.2.1.4. Néphrites	48

III.2.1.5. La spiruline contre le VIH	49
III.2.1.6. Effets contre l'hyperlipidémie	49
III.2.1.7. Effets protecteurs contre les radiations	50
III.2.1.8. Effets contre la toxicité des reins.....	50
III.2.1.9. Effets sur la flore intestinale	50
III.2.1.10. Effets contre le diabète, l'obésité et l'hypertension.....	51
III.2.1.11. Spiruline et femmes	51
III.2.1.12. Spiruline et régime	52
III.2.1.13. Spiruline et végétarisme	52
III.2.1.14. La spiruline et les sportifs (L'augmentation de la VO2 max).....	52
III.2.2. Spirulina platensis et l'industrie pharmaceutique.....	53
III.2.3. Spirulina platensis et l'industrie cosmétique.....	53
III.2.4. Spirulina platensis et l'industrie alimentaire	54
III.2.4.1. Alimentation animale.....	55
III.2.4.2. Alimentation humaine.....	55
III.2.4.3. Cuisiner la spiruline.....	55
III.2.4.4. La lutte contre la Malnutrition.....	56
III.2.5. Principales utilisations	58
Chapitre IV : Technique d'extraction et dosage des différentes fractions biochimiques de la spiruline	
VI.1. Méthodes de dosage.....	59
VI.1.1. Dosage des protéines de la spiruline.....	59
VI.1.2. Dosage des lipides.....	60
VI.1.3. Dosage des glucides.....	60
VI.1.4. Dosage de vitamine B12.....	61
VI.1.5. Dosage des chlorophylles et des caroténoïdes de la spiruline (la méthode de Hansmann, 1973)	61
VI.2. Méthodes d'extraction.. ..	62
VI.2.1. La phycocyanine.....	62
VI.2.2. Le calcium.....	63
Conclusion générale.....	64
Références bibliographiques.....	65
Annexes.....	68
Résumé et Mots clés.....	75

LISTE DE FIGURES

Numéro	Titre	Page
Figure 1	Différentes formes cellulaires des cyanobactéries.	13
Figure 2	Vue au microscope optique (G 100x10) des filaments de spiruline.	18
Figure 3	Morphologies typiques de Spiruline Source : Antenna Technologie modifiée	21
Figure 4	Cycle biologique de la Spiruline selon Balloni et al.	22
Figure 5	composition nutritionnelle pour 10g de spiruline.	29
Figure 6	un bassin en tissu polyamide enduit PVC, Ecopark, Madurai, Tamil Nadu (Inde), 18 m ² , 1998.	42
Figure 7	Dans un village près de Madurai, Tamil Nadu (Inde), 1 m ² , 1996 .	42
Figure 8	Diagramme récapitulatif des paramètres de culture et de traitement de spiruline	44
Figure 9	Récolte de Spiruline en salle après pré-concentration (A) et récolte directe sur le bassin de culture (B)	45
Figure 10	Extrusion de biomasse pressée, avec pistolet à silicone Sika (professionnel, typemanuel "à poche"), sur un plateau de séchoir électrique Stoeckli, Mialet, 1998 .	46
Figure 11	Photo d'un enfant dénutri ayant été traité avec 10g/j de spiruline pendant 3 mois.	57

LISTE DES TABLEAUX

Numéro	Titre	Page
Tableau I	comparaison entre les phylums .	11
Tableau II	Principaux ordres des cyanobactéries et leurs principaux genres.	16
Tableau III	Systématique de la spiruline.	20
Tableau IV	Sites de gisements naturels de Spiruline dans le monde selon FOX.	23
Tableau V	les principaux constituants chimiques et biochimiques de la spiriline.	26
Tableau VI	rapports d'efficacité protéique comparés, intérêt des complémentations	29
Tableau VII	la répartition des acides gras pour deux souches de spiruline.	31
Tableau VIII	teneur en acides nucléiques de quelques aliments.	32
Tableau IX	Vitamines hydrosolubles contenues dans la biomasse de Spirulina platensis en fonction des saisons (mg/100g de matière sèche).	33
Tableau X	Vitamines liposolubles contenues dans la biomasse de Spirulina platensis (mg/100g de matière sèche).	33
Tableau XI	Teneur en oligoéléments dans la spiruline.	34
Tableau XII	Analyse d'un milieu de culture typique.	43
Tableau XIII	tests cliniques qui présentent l'effet de la spiruline sur autre maladies.	51

LISTE DES ABREVIATIONS

FEPS : Fondation de l'Eau Potable Sûr.

HEDS : Haute Ecole De Santé Genève.

IRD : Institut de Recherche pour le Développement.

CSSD: Cyanobacteria for Health for Science and Development.

IOPR : Institut Océanographique Paul Ricard.

PV VIH : Personnes Vivant avec le VIH.

VO₂ : Volume d'Oxygène.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction

Dans le monde, plus de 800 millions de personnes, dont 200 millions d'enfants de moins de 5 ans souffrent de sous-alimentation. Par ailleurs, des milliers d'enfants meurent chaque jour emportés par des maladies infectieuses sévèrement aggravées par la malnutrition. Les régions où l'explosion démographique est la plus forte sont aussi celles où sévit une pénurie chronique de nourriture. C'est pourquoi la FAO, l'OMS et l'UNICEF ont recommandé aux chercheurs du monde entier de réexaminer le potentiel alimentaire de l'humanité. Des ressources ignorées jusqu'alors commencent à émerger grâce à ces recherches, parmi ces ressources figure la spiruline (ANONYME., 1996).

Le spiruline, cyanobactérie traditionnellement consommée depuis des siècles par certaines populations (Farrar, 1966), et de nos jours encore au Tchad (Léonard, 1966; Delpeuch, 1975; Sorto, 2003) font l'objet d'une redécouverte depuis quelques années. Autrefois classées parmi les "algues bleues-vertes", elles ne sont pas à proprement parler des algues, même si par commodité on continue à les désigner comme telles. C'est d'abord l'impressionnante teneur en protéines des spirulines, ainsi que leur vitesse de croissance, dans des milieux totalement minéraux, qui ont attiré l'attention des chercheurs, comme des industriels (FALQUET., HUNRI., 2006).

Différents acteurs de la recherche pour le développement sont alors intervenus pour étudier la Spiruline dans son milieu naturel (au Tchad et au Mexique), pour analyser ses constituants, particulièrement ses propriétés nutritionnelles, pour développer des systèmes de culture adaptés aux pays en voie de développement. Ces acteurs étaient des instituts français (ORSTOM, IFP), des chercheurs de différents pays, des organismes de financement (DGRST, FAO, UNICEF), des ONG. Par la suite, les instituts français et certains bailleurs de fonds se sont désintéressés de la Spiruline (LOIC, 2004).

Au cours de ces 30 dernières années de très nombreuses expériences de production de Spiruline ont eu lieu dans le monde entier, apportant technologie et savoir faire pour la réalisation de systèmes modulaires de production adaptés à un large éventail de pays du Tiers Monde. Plusieurs implantations industrielles sont aujourd'hui opérationnelles principalement en Asie et en Amérique (LOIC, 2004).

A l'instar des pays en voie de développement et particulièrement ceux d'Afrique, l'Algérie déploie des efforts dans le but de garantir une indépendance économique, agricole et notamment alimentaire. Parmi les secteurs ciblés par le plan national du développement (agricole et rurale PNDAR), on note, l'aquaculture.

La tentative d'introduction de la spiruline dans nos habitudes alimentaires, nous oblige, dans un premier temps, de bien maîtriser les conditions de sa culture et une sensibilisation visant à mettre en évidence, ses perspectives éventuelles.

Le présent travail, est divisé en quatre chapitres :

- ü 1-Généralité sur les algues.
- ü 2-La composition chimique et biochimique et la valeur nutritionnelle de la spiruline
- ü 3-Conditions de culture de la spiruline et domaines d'utilisation.
- ü 4-Techniques d'extraction et dosage des différentes fractions biochimiques de la spiruline.

CHAPITRE I

Généralités sur les algues

I.1. Généralités sur les algues

Les algues sont des organismes chlorophylliens se développant dans l'eau ou dans des milieux très humides. Bien que surtout abondantes dans les eaux des mers, des lacs, des mares, des eaux courantes et des eaux thermales, on en trouve également sur les rochers humides et sur la terre et exceptionnellement, elles peuvent être endophytes de tissus animaux ou végétaux (Andres, 1981).

L'air, la lumière et des sels dissous sont, en plus de l'eau, nécessaires à leur développement. Groupées avec les champignons dans la division des Thallophytes, les algues constituent en réalité un vaste ensemble hétérogène d'embranchements très distincts les uns des autres et n'ayant entre eux que peu de caractères communs (Feldmann, 1963). La distinction entre ces différents embranchements d'algues est faite d'après des caractères d'ordre cytologique et biochimique ainsi que des différences de structure et de mode de reproduction. En dehors de nombreuses formes unicellulaires, on trouve des algues pluricellulaires formant des thalles sans feuilles, ni tiges, ni racines, ni vaisseaux conducteurs (Andres, 1981).

Les algues sont divisées en 6 grands phylums d'après la nature des pigments et des réserves cellulaires (Andres, 1981). Parmi ses réserves : amidon chez les algues verts, autres glucides voisins la glycogène chez les algues rouges, et variables mais jamais d'amidon en cas d'algues brunes (Marfaing *et al*, 2007) ; ce sont les Cyanophytes, les Chlorophytes, les Euglénophytes, les Chrysophytes, les Rhodophytes et les Pyrrophytes... (Andres, 1981).

Tableau I : comparaison entre les phylums .

Phylums	Les constituants	Les pigments	Les réserves
Les cyanophytes	Manque de noyau, chromatophores et de flagelle. une teinte bleu-verte	Chlorophylle vert a et c, phycocyanine bleu-vert et phycoérythrine rouge et β carotène	glycogène
Les Chlorophytes	Présence de noyau, deux ou quatre flagelles du même taille, teinte verte	Chlorophylles a et b, β et α carotène et xanthophylles	Amidon intraplastidiale

Les eulénophytes	Présence de flagelle ,teinte rouge qui masque la teinte verte	Chlorophylles a et b , β carotène et des xanthophylles	Grains de paramylonextraplastidiale
Les chrysophytes ou chromophytes	Présence de flagelle, chromatophore brune, jaune ou vert jaunâtre	Chlorophylles a et c , β carotène	Jamais d'amidon
Les Rhodophytes	Manque du flagelle ,une teinte rougeâtre	Chlorophylles a et d , β et α carotène et des xanthophylles	Rhodamylon ou amidon floridée extraplastidiale
Les pyrophytes	Forme biflagellée	Chlorophylles a et c , β carotène ,biliprotéine	Amidon extraplastidiale

ANDRES (1981)

I.2. Généralités sur les cyanobactéries

Les algues constituent un vaste assemblage artificiel d'organismes polygénétiqement éloignés, dont l'étude, pour des raisons historiques, a cependant donné naissance à une discipline : la phycologie.

La classification des algues est partiellement biochimique, mais reste encore fondée sur les caractéristiques plastidiales telle que la nature et la localisation des pigments (chlorophylles, phycobilines, carotènes et caroténoïdes) ou la disposition des thylacoïde (DE REVIERS, 2003).

Les algues bleues sont nommées "Cyanobactéries". Les cyanobactéries forment l'essentiel des bactéries capables de la photosynthèse avec production d'oxygène (BOURREL, 1985).

I.2.1.Cytologie

I.2.1.1.Aspects cellulaires

Ce sont des végétaux unicellulaires ou pluricellulaires, fondamentalement autotrophes, constitués d'éléments identiques isolés ou disposés en file linéaire, dépourvus d'un noyau à membrane définie et de mitochondrie (GRASSE *et al*, 1963) .

Elles peuvent être unicellulaires ou pluricellulaires; dans ce dernier cas, leurs cellules s'arrangent en amas de type colonies ou, le plus souvent, en filaments composés de cellules alignées (ces filaments sont appelés trichomes). La taille des cellules de cyanobactéries se situe généralement entre 1 et 10 microns (Falquet, 1996).

Les cellules présentent une coloration homogène car elles n'ont pas de plastides individualisés. En effet, elles sont faites d'une zone périphérique colorée, chromoplasma, et une partie centrale plus claire, centroplasma ou nucléoplasma. Ce dernier fait fonction du noyau mais reste souvent diffu et sans membrane limitant (BOURRELY, 1985).

Les cyanobactéries, sont ainsi nommées car elles présentent toutes les caractéristiques essentielles des procaryotes : l'ADN (se localise dans des zones données du cytoplasme) n'est pas associé à des histones, sa réplication et sa répartition dans les cellules filles, ne sont pas bien connues, mais on peut supposer qu'elles se font d'une manière semblable à celle des bactéries. Il n'y a pas de mitochondries, ni de dictyosomes, ni de réticulum endoplasmique, ni de plastides (NULTSCH, 1998).

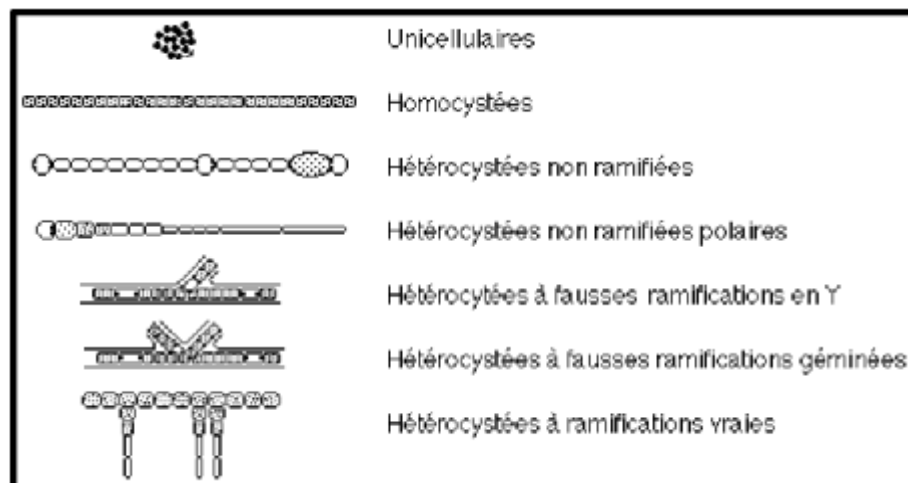


Figure 1 : Différentes formes cellulaires des cyanobactéries (NULTSCH, 1998).

I. 2.1.2.Paroi cellulaire

La paroi proprement dite contient des substances à haute poids moléculaire; dont les plus abondantes sont des protéines, des lipides, des polysaccharides et une substance particulière la mureine. Cette dernière est un mucopolymère dont les molécules forment un

réseau, qui donne sa constance à la paroi, cette molécule existe tant chez les bactéries que chez les cyanobactéries (GRASSE *et al*, 1963). Les cyanobactéries sont des bactéries GRAM-, ce qui signifie que, en plus de leur membrane plasmique et d'une paroi contenant de peptidoglycanes, elles sont recouvertes par une seconde membrane lipopolysaccharidique ; responsable de la coloration de GRAM-. Cette membrane est liée à la couche de peptidoglycane par des lipoprotéines pariétales (DE REVIERS, 2003).

I.2.1.3. Pigments

Ils sont nombreux, à savoir : la chlorophylle verte, phycoérythrine bleu-verte, la phycoérythrine rouge et des pigments d'accompagnement; carotène et xanthophylle rouge ou ochracés (GRASSE, et FEDMANN, 1963).

Du fait de la présence simultanée de ces différents pigments (en proportions variables) , ces algues prennent différentes couleurs ; rouges (*Trichodesmum erythraeum*), plus ou moins noirâtres (*Nostoc* commune) ou verdâtre (*Spiruline*) (DE REVIERS ,2003).

Chez les cyanobactéries existent la chlorophylle a et c ; l'absence de la forme b a été constatée dans diverses espèces. La forme c ou chlorofucine est un produit de dégradation de la chlorophylle a (GRASSE et FEDMANN, 1963).

I.2.2. Mode nutritionnel

Il s'agit d'organismes pour la plupart photosynthétiques donc autotrophes, (DE REVIERS ,2003). Les cyanobactéries pratiquent l'autotrophie grâce à leurs chromoplastes feuillés et imprégnés de chlorophylle (GRASSE et FEDMANN, 1963).

Les cyanobactéries réalisent la photosynthèse oxygénique et possèdent les deux photosystèmes, en utilisant comme donneur d'électrons l'eau, H₂S, H₂ ou des composés organiques (DE REVIERS ,2003).

Les cyanobactéries assimilent le carbone à travers le cycle de Calvin et stockent l'énergie et le carbone sous forme de glycogène. Les cyanobactéries varient considérablement dans leurs schémas métaboliques. Elles ont en commun l'absence de cycle de Krebs complet.

Beaucoup de cyanobactéries, surtout parmi les filamenteuses, sont capables de réduire (fixer) l'azote de l'air, grâce à des structures spécialisées appelées hétérocystes (FALQUET, 1996) .

Cependant, certaines espèces peuvent être hétérotrophes ; des Oscillaires, pigmentées, cultivées à l'obscurité, dans des milieux additionnés de sucre, d'amidon et d'inuline, deviennent hétérotrophes (GRASSE et FEDMANN, 1963).

I.2.3.Reproduction

Jusqu'ici aucun phénomène de sexualité n'a été rapporté relativement aux cyanobactéries. La division binaire des cellules assure la multiplication des espèces unicellulaires et la croissance dans les formes pluricellulaires. Tout individu d'une espèce unicellulaire ou toutes les cellules disposées en filament ou en chapelet ont la faculté de se multiplier par bipartition (GRASSE et FEDMANN, 1963) .

Il existe trois types de base de reproduction asexuée :

La fragmentation : le thalle se casse et chaque partie repousse pour former un nouveau thalle.

La sporulation : les spores peuvent être formées dans les cellules végétatives ordinaires ou dans les structures spécialisées appelées sporanges.

Scission binaire : elle se produit par division du noyau puis du cytoplasme.

I.2.4. Mobilité

La plupart des cyanobactéries sont capables de se déplacer, soit à l'aide de vésicules gazeuses (dans les liquides) soit, dans le cas des cyanobactéries filamenteuses, par glissement (jusqu'à 25 microns par seconde) grâce à des microfibrilles (FALQUET, 1996).

I.2.5.Ecologie

Les cyanobactéries, organismes panchroniques par excellence n'ont probablement que peu variées depuis le Précambrien (2700 Millions d'années ou plus), elles possèdent une grande adaptabilité et peuplent des milieux très variés ; beaucoup se contentent

même des terres humides. Les conditions les plus sévères à lesquelles la vie reste possible n'arrêtent pas leur vie active, ainsi les trouve-t-on dans les eaux très chaudes, des eaux très froides, dans les eaux douces et des eaux chargées en sels variés (GRASSE, et FEDMANN, 1963).

Entre certaines cyanobactéries et d'autres organismes s'établissent des relations symbiotiques. Soit associées avec des champignons pour constituer les lichens, soit dans les organes de quelques plantes supérieures (FELDMAN, 1985).

Certaines cyanobactéries sont attachées à la surface de diverses structures, tandis que d'autres mènent une vie parasitaire. Ainsi des cyanobactéries filamenteuses de la famille des Oxillaspiracées (ordre des Nostocales) vivent dans le tube digestif de divers vertébrés (ROGER, 1976).

I.2.6. Classification

Il en existe au moins 2 000 espèces, réparties dans plus de 150 genres (voir le tableau II).

Tableau II: Principaux ordres des cyanobactéries et leurs principaux genres.

Ordre	Caractères distinctifs	Principaux genres	caractère
Chroococcales	Unicellulaires ou multicellulaires ; non filamenteux presque toujours immobiles	Chamaesiphon Synechococcus Gloeotheca Microcystis	Division par bourgeonnement. Bacilles originaires d'eaux douces et marines, et de sources chaudes. Coque dans une gaine commune ; fixent l'azote. Coque ; vacuoles gazeuses ; peuvent provoquer des <i>vater blooms</i> toxiques
Pleurocapsales	Formation des béocystes	Dermocarpa	

Oxillatoriales	Filaments droits sans cellules spécialisées généralement mobiles et peuvent produire des hormogonies	Oxillatoria Trichodesmium Lyngbia Spiruline	Trichomes droites ; quelques vacuoles gazeuses ; dans les eaux douces ou chaudes
Nostocales	Filaments droits avec hétérocystes souvent mobiles et peuvent produire des akinètes	Anabaena Aphanizomenon Nostoc Rivularia Gleotrichia	Trichomes non effilés, la plupart mobiles par glissement ; beaucoup à vacuoles gazeuses
Stigonematales	Filaments ramifiés, peuvent produire des akinètes	Fischerella	

PERRY *et al* (2004)

I.3. La spiruline

Le groupe des cyanobactéries, anciennement appelées algues bleues, compte parmi l'une des plus anciennes formes de vie sur terre et constitue l'essentiel des bactéries capables de la photosynthèse avec production d'oxygène, parmi elles, existe le genre *Spirulina* ou *Arthrospira*, des cyanobactéries filamenteuses dont fait partie une bactérie particulièrement intéressante dénommée *Spirulina platensis* (ou *Arthrospira platensis*) plus connue sous le nom de Spiruline (Sébastien, 2008) .

Consommée depuis des siècles par certains peuples primitifs d'Afrique et d'Amérique, et connue par les scientifiques depuis plusieurs décennies pour sa richesse nutritionnelle, elle fait l'objet d'une redécouverte depuis quelques années (Sébastien, 2008) .

Compte tenu de ses caractéristiques, la culture de la spiruline pourrait être une solution pour améliorer la santé humaine, la nutrition notamment dans les pays du tiers-monde et également pour développer des cultures industrielles. Cette cyanobactérie semble actuellement l'une des meilleurs solutions pour la production simple d'un complément alimentaire de haute qualité et, du fait, de grandes entreprises se sont lancées dans la culture de cet organisme à une échelle industrielle (Sébastien, 2008) .

Outre des propriétés nutritionnelles avérées, la spiruline connaît aujourd'hui un regain d'intérêt de la part de la communauté scientifique internationale du fait de sa possible utilisation comme source de produits à vertus thérapeutiques. En effet, le potentiel de cette micro-algue semble être important et ceci principalement grâce à son principal pigment, la phycocyanine, donnant à cet organisme sa couleur bleue-verte caractéristique (Sébastien, 2008) .

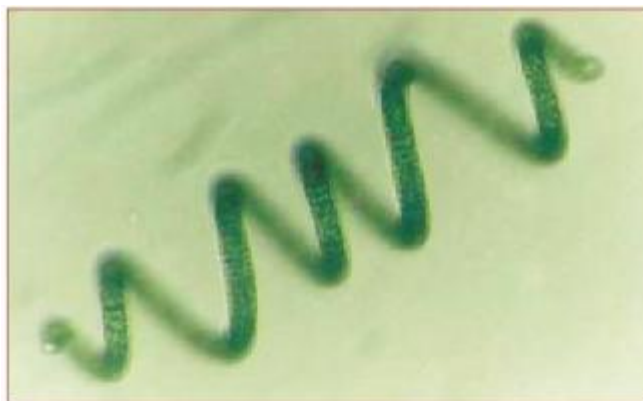


Figure 2 : Vue au microscope optique (G 100x10) des filaments de spiruline (Murielle, 2010).

I.3.1. Historique de la spiruline

Algue microscopique en forme de spirale, la spiruline (*Arthrospira platensis*) est une des premières formes de vie sur terre. On parle d'algue, c'est plus précisément une cyanobactérie, c'est à dire une bactérie réalisant la photosynthèse. L'origine de la terre remontant à 4,5 milliards d'années, les cyanobactéries apparurent vers 3,5 milliards d'années (Gustavson *et al*, 2000).

Grâce à l'énergie lumineuse, la spiruline est désormais capable de transformer le gaz carbonique en matière organique, au cours d'un processus complexe qui dégage de l'oxygène. Ceci a permis l'enrichissement de l'atmosphère en oxygène (O₂) puis la formation d'ozone (O₃) protégeant ainsi la terre des rayonnements ionisants. (Gustavson *et al*, 2000).

Les aztèques Consommaient de la spiruline. Le conquistador espagnol Cortès rapporte dans ses mémoires cette curieuse habitude qu'avaient les indiens de promener à la surface des lacs des filets très serrés pour récolter une sorte de boue verte qu'ils faisaient sécher au soleil pour la consommer ensuite sous forme de galette (Gustavson *et al*, 2000) .

Dans la région du Kanem, au Nord-est du Tchad, vivent les Kanembous . De tradition immémoriale, les femmes kanembus récoltent à la surface de certaines mares fréquentées par les flamants roses, une sorte de bouillie verte qui y pousse spontanément : la spiruline, une fois séchée en galette (dihé) dans le sable, celle-ci trouve son chemin jusqu'au' marché local ou directement dans la marmite. La spiruline s'accorde idéalement avec la boule de mil qui est à la base de l'alimentation de cette région (Gustavson *et al*, 2000) .

Dans les 10 dernières années, les cultures intentionnelles et intensives de spirulines se sont implantées en plusieurs endroits du monde. La culture industrielle a repris sur le lac au Mexique en 1976 par la société Sosa Texcoco. Depuis, plusieurs entreprises se sont implantées un peu partout : Siam Algae Company à Bangkok en 1979, Earthrise farm aux Etats-Unis en 1983 (le plus gros producteur actuel), Cyanotech Corporation à Hawaï, etc. En 1995, il existait une vingtaine d'exploitations industrielles dans le monde. Actuellement, leur nombre avoisine la trentaine et les techniques de la biotechnologie moderne permettent d'obtenir un produit de haute qualité, contenant jusqu'à 70 % en poids sec de bonnes protéines alimentaires (Sébastien, 2008) .

I.3.2. Classification

La Spiruline était à l'origine considérée comme une algue. Cependant, en 1960 une claire distinction entre procaryote et eucaryote a été définie, basée sur la différence d'organisation cellulaire : les procaryotes regroupent les organismes dépourvus de compartiment cellulaire tandis que les eucaryotes regroupent ceux qui possèdent des organelles, c'est à dire des nucléoles et des mitochondries (Isabelle *et al* , 2002) .

Tableau III: Systématique de la spiruline.

REGNE	MONERA
SOUS-REGNE	PROCARYOTA
PHYLUM	CYANOPHYTA
CLASSE	CYANOPHYCEAE
ORDRE	NOSTOCALES
FAMILLE	OSCILLATORIACEAE
GENRE	ARTROSPIRA
ESPACE	A.PLATENSIS

ISABELLE *et al* (2002)

En 1962, Stanier *et al* constataient que cette algue bleue-verte était dépourvue de compartiments cellulaires, et donc faisait partie des procaryotes ; ils proposaient de désigner ce microorganisme «Cyanobactérie». Cette nouvelle désignation est finalement acceptée et figure pour la première fois au «Bergey's Manual of Determinative Bacteriology en 1974» (JARISOA, 2005) .

Cette micro-algue change de forme en fonction des caractéristiques physiques et chimiques du milieu, dans lequel, elle se trouve. Mais on remarque aussi que dans un même milieu on trouve des variétés des formes . C'est peut être là l'origine de la confusion entre les termes Spirulina et Arthrospira (JARISOA, 2005).

I.3.3. 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, qui ressemble à un minuscule ressort à boudin, d'où le nom de «Spiruline» (Geitler, 1932). On trouve cependant des Spirulines ondulées et parfois droites (JARISOA, 2005).

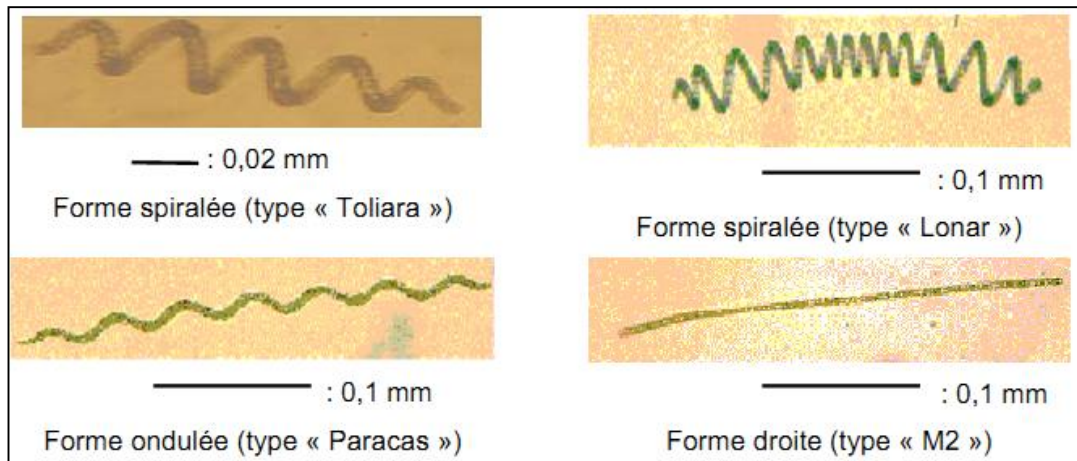


Figure 3 : Morphologies typiques de Spiruline Source : Antenna Technologie modifiée (JARISOA, 2005).

Ces différentes formes dépendent des conditions écologiques dans lesquelles vivent les Spirulines. Une étude (basée sur la caractérisation moléculaire de l'ITS [Internally Transcribed Space] de l'opéron ARN ribosomal) portant sur la diversité génétique de 51 souches d'*Arthrospira* provenant de 4 continents arrive à la conclusion que les génotypes sont très conservés et correspondent peut-être à une ou deux espèces génétiques (Wilmotte et al., 2004). Cela laisse supposer que le nombre d'espèces du genre est réduit.

I.3.4. Bio-Écologie

La Spiruline est composée de cellules transparentes empilées bout à bout pour former un filament ou trichome enroulé en forme hélicoïdale. Cette rotation du trichome sur lui-même se fait suivant un sens déterminé, dans le sens des aiguilles d'une montre, si on regarde par-dessus la spirale en descendant (Jourdan , 1999).

Elle semble avoir une valeur spécifique mais la cause en reste indéterminée. Grâce à cette morphologie, elle se déplace dans l'eau en adoptant le mouvement d'une vis. Le cycle biologique de la Spiruline selon Balloni *et al* est représenté dans la figure 4 (JARISOA, 2005)

Filament en maturité forme des cellules spéciales appelées nécridies, des disques de séparation biconcaves. Au niveau de ces cellules le trichome se fragmente pour donner naissance à des nouveaux individus de courtes chaînes (2 à 4 cellules) appelées hormogonies. Par division binaire des cellules, les hormogonies croissent en longueur et prennent la forme typiquement hélicoïdale.

Dans les conditions expérimentales, le temps de génération maximal de la Spiruline est voisin de 7 heures (JARISOA T, 2005) .

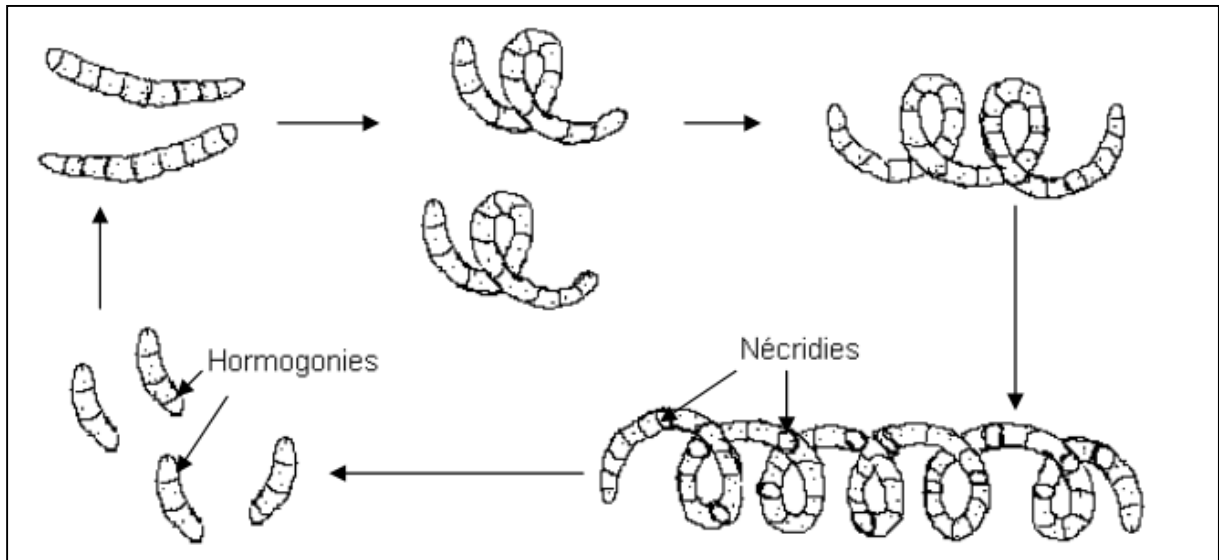


Figure 4 : Cycle biologique de la Spiruline selon Balloni et al (JARISOA, 2005).

La Spiruline est un organisme ubiquiste. Elle se développe préférentiellement dans des eaux chaudes tropicales du monde entier, principalement, dans les lacs alcalins d'Afrique autour du Tchad (*Spirulina platensis*) et d'Amérique dans la vallée de Texcoco au Mexique (*Spirulina geitleri* ou *S. maxima*).

Elle est thermophile, son besoin en lumière et en température a limité son aire de répartition naturelle à une bande située approximativement entre 35 ° de latitude Nord et 35° de latitude Sud (JARISOA, 2005) .

I.3.5 . Les gisements naturels dans le monde

La présence d'un gisement naturel de Spiruline dans un lac ou une mare n'est pas due au hasard, mais aux différents facteurs climatiques et pédologiques qui rendent favorable le développement de ce microorganisme. Les milieux privilégiés sont alcalins et riches en nutriments azotés et phosphorés. Ils sont de plus bien éclairés et présentent une température élevée. De telles conditions se trouvent naturellement dans de nombreux sites répartis sur la ceinture intertropicale.

Le Tableau IV présente des sites possédant des gisements naturels de Spiruline localisés dans différents pays du monde entier d'après Fox (1999b) (JARISOA, 2005) .

Tableau IV : Sites de gisements naturels de Spiruline dans le monde selon FOX (1999) .

Payes d'Afrique	Sites
Algérie	Tamanrasset(E. Boileau,1988)
Tchad	La région du Kanem :les lacs Latir, Ouna, Borkou, Katam, Yoan, Leyla, Bodou, Rombou, Morliwa, Iseiron, Ounianga Kebir
Soudan	Cartère du Djbel Marra
Djibouti	Lac Abber
Ethiopie	Lacs Aranguadi, Lesougouta, Nacourou , Chillu, Navasha, Rodolphe
Congo	Moungounga
Kenya	Lac Nakuru, Elmenteita, Cratère, Natron
Tanzanie	Lac Natron
Tunisie	Lac Tunis (M.Belkir,1978), Chott el jerid (M.Belkir,1997)
Zambie	Lac Bengweoudou
Madagascar	Beaucoup de petits lacs près de Tolira(Nguyen Kim Ngan, 1994)
Asie	
Inde	Lac Lonar(Damle, 1978), un réservoir près de Madurai(J. Bai, 1984), une réserve près de Calcutta(K .Biswas), Lac Nagpur(S. Pargaonkar, 1981)
Myanmar	Lacs Twyn Taung, Twyn Ma et Taung Pyank(Min Thien, 1984)
Sri lanka	Lac Beira
Pakistan	Mares près de Mlahore(R. D. Fox, 1980 ; Ghose, 1924)
Thaïlande	Lacs d'effluents d'une usine de tapioca, province de Radburi, 80 km au S.O de Bangkok (Marakot Tanticharoen, 1924)
Azerbaïdjan	(Woronichin, 1924)
Amérique du sud	
Pérou	Lac Huacachina, près d'Ica, maintenant rempli d'eau douce, il ne contient plus de spiruline. Lac Orovilca (R.Lopez, 1980) , maintenant asséché, Lac Ventanilla, sur la cote près de Lima (M. Figuera, 1987) : on n'en trouve plus actuellement. Réservoir d'eau près de paracas (G.Planchon & R .Fuentes, 1993)
Mexique	Lac Taxcoco (M.David, 1976). Lac Cratère (H. Durrand Chastel, 1990)
Uruguay	Montevideo, signé par Arechavaleta in Witlock & Nordstedt (1884)
Pérou	Trouvé en association avec <i>Cladophora</i> près de l'île d'Amantani dans le lac Titicaca (R.D. Fox, 1993), spécimen de <i>Cladophora</i> de Gilles Planchon & Rosario Fuentes
Equateur	Lac Quilotoa : cratère de diamètre 1km (Yann Leroux, 1998)

Amérique du nord	
Californie	Okland, Key Route Power House (N. L. Gardner, 1917 à, Del Mar Beach (R. A. Lewin, 1994) . Un moulin à huile (Knutsen G.,1994)
Haiti	Lac Gonave(M. Pierre,1986)
République dominicaine	Lac Enriquillo (H. Durand-Chastel, 1993)
Europe	
Hongrie	(J. Kiss, 1957)
France	Camargue(G. Plachon & R. Fuentes, 1994)
Autres sites possibles	
	Partout où vivent et se reproduisent le flamant nain, <i>phoenocnaias minor</i> , en Afrique et en Asie, et le flamant de James, <i>phoenicoparrus jamesi</i> , en Amérique du sud(Ogilvie M. et C. , 1986)
Ethiopie	Lac Abiata
Kenya	Lac Rodolphe, Lac Hannington
Tanzanie	Lac Manyara, Lac Rukua
Zambie	Lac Mweru
Botswana	Makgadikgadi Salt Pans
Namibie	Etosha Salt Pan
Afrique du sud	Etat Libre d'Orange, près de Vaaldam
Bolivie	Lac Colorado, Pooppo, Challviri, Salar de Uyuni
Chili	Agua Calientes, Lagunas Brava, Lac Vilama, Salar de Surire
Mauritanie	Cote Sud
Inde	Rann of Kutch, Gujarat
Madagascar	Cote Ouest – Toliara

JARISOA (2005)

CHAPITRE II

***Composition chimique et biochimique
et valeur nutritionnelle de la spiruline***

II.1. Composition chimique et biochimique de la spiruline

La spiruline est un aliment naturel qui a des valeurs nutritionnelles exceptionnelles. Championne toute catégorie, elle contient plus de protéines, de bêta-carotène, de vitamine B 12, de fer, et d'acide gamma linolénique qu'aucun autre aliment connu. La spiruline est extrêmement riche en protéines puisqu'elle en contient près de 70% (soit trois fois plus que le poisson et la viande maigre) (Falqet, 2006).

Complète, équilibrée et dépourvue de graisse et de cholestérol, la teneur protéique de cette micro-algue, riche des 8 acides aminés essentiels à l'organisme, font de la spiruline un aliment d'une haute valeur biologique. A noter l'excellente biodisponibilité de ses protéines puisque le taux d'assimilation est 60 % plus facile que celles contenues dans la viande (Falqet, 2006).

Par ailleurs, la spiruline est pourvue de la plupart des vitamines, elle fournit une quantité phénoménale de bêta-carotène (15 fois plus que dans les carottes) et apporte à l'organisme toutes les vitamines du groupe B, dont la vitamine B12 qu'elle contient proportionnellement 4 fois plus que dans le foie. En outre, on retrouve dans cette algue de nombreux minéraux et oligo-éléments : calcium, phosphore, magnésium, potassium, sodium, cuivre, zinc, manganèse, et du fer en grande proportion (45 fois plus que dans les épinards) (Falqet, 2006).

Sa très haute teneur en fer est à souligner doublement du fait que les carences en fer sont très répandues (anémies), surtout chez les femmes enceintes, les enfants, les adolescentes et les sportifs, et que les bonnes sources alimentaires de fer sont rares.

La spiruline contient également des acides gras essentiels Omega 3 et 6, qui se montrent extrêmement bénéfiques au niveau des apports énergétiques mais également en ce qui concerne le métabolisme du cholestérol. Entre autre, elle a l'avantage d'être une riche source d'acide gamma-linolénique (AGL), un acide gras insaturé issu de la famille des omégas 6, qui s'avère particulièrement utile dans la prévention du vieillissement cutané et l'hydratation de la peau (Falqet, 2006).

Tableau V : les principaux constituants chimiques et biochimiques de la spiruline .

Composition nutritionnelle	Composition pour 10g	% AJR	role
Protéines (vétales)	55 à 70 %	-	Construction du corps
Glucides	15 à 25 %	-	Apport de l'énergie à l'organisme
Lipides	4 à 7 %	-	Réserve énergétique, fabrication des hormones ,bon fonctionnement de l'organisme
Méniraux	7 à 13 %	-	(voir plus bas)
Fibres	2 à 8 %	-	Amélioration du transit intestinal
Vitamines			
A (Béta-carotène)	14 mg	100 %	Vision , croissance , antioxydant
E	1 mg	10 %	Lutte contre le vieillissement
B1	0,35 mg	30 %	Participe à l'équilibre du système nerveux , des muscles et du cerveau
B2	0,4 mg	30 %	Lutte contre le vieillissement de la peau rides ,lésions oculaires
B3	1,4 mg	9 %	Indispensable au bon fonctionnement des cellules du cerveau et du système nerveux
B5	0,01 mg	0,2 %	Accroît la résistance à la fatigue et au stress et combat le vieillissement cellulaire
B6	0,01 mg	4 %	Facilite la digestion et l'assimilation des aliments , stimule le système immunitaire
B8	0,005 mg	0,5 %	Appétit , perte de cheveux
B9	0,01 mg	2,5 %	Nécessaire à la croissance et à la division des cellules
B12	0,032 mg	1000 %	Fatigue , circulation , croissance
I	6,4 mg	-	Action sur le système nerveux , anticancéreux
K	0,224 mg	300 à 500 %	Favorise la coagulation , lutte contre le vieillissement
Minéraux			
Calcium	100 mg	10 %	Nécessaire à la formation des os et des dents , à la croissance et à la coagulation du sang , aux transmissions nerveux , à la croissance et aux contractions musculaires

Fer	18 mg	100 %	Essentielle à la formation de l' hémoglobine et au transport de l' oxygène dans le sang . il accroît la résistance à la fatigue , aux infections et au stress
Magnésium	40 mg	20 %	Très important dans le fonctionnement des cellules , de l' influx nerveux , à la contraction et au développement des muscles , à la formation des anticorps
Phosphore	80 mg	8 %	Stimule la croissance et la mémoire
Potassium	140 mg	5 %	Rôle essentiel dans la perméabilité des membranes des cellules . Il régularise le rythme cardiaque et la tension artérielle , améliore les facultés mentales et oxygène le cerveau
Zinc	0,3 mg	3 %	Stimule le système immunitaire , action anti oxydante , favorise la croissance
Cuivre	0,12 mg	5 %	Entretien des cartilages et des os , lutte contre les infections , bon fonctionnement du cœur
Manganèse	0,5 mg	17 %	Participe à l'utilisation des glucides et des lipides par l'organisme , lutte contre les radicaux libres
Sodium	0,09 mg	-	Régulation de l'acidité et de la répartition de l'eau dans l'organisme , contribue au bon fonctionnement musculaire
Chrome	0,028 mg	16 %	Intervient dans le métabolisme des glucides
Sélénium	0,002 mg	2 %	Antioxydant , détoxiquant , renforce le système immunitaire
Acide gras essentiels			
Acide linoléique	80 mg	-	Stimule le système immunitaire
Acide gamma-linoléique	100 mg	-	Stimule le système immunitaire , la peau , les cheveux
Acides aminés essentiels			
Isoleucine	350 mg	50 %	Améliore la coordination musculaire et la réparation des tissus, normalise le taux d'azote dans les muscles, diminue le taux de sucre dans le sang, lutte contre les manifestations hypoglycémiques, augmente la résistance

			aux efforts physiques, favorise le métabolisme musculaire
Leucine	540 mg	49 %	Diminue le taux de sucre dans le sang , aide à régénérer et à réparer les tissus musculaires régule le taux d'azote dans les muscles, augmente la résistance aux efforts physiques
Lysine	290 mg	36 %	Participe à la formation des anticorps et à régénération de tissus endommagés, stimule le système immunitaire et endocrinien, prévient les éruptions cutanées, aide à lutter contre le manque d'énergie et d'appétit, aide au problème de retard de croissance chez l'enfant, facilite la formation du collagène
Méthionine	140 mg	70 %	Puissant antioxydant qui neutralise les radicaux libres et prévient le vieillissement, favorise la lutte contre la dépression, les troubles du comportement, l'hypertension, les problèmes rénaux, aide à l'élimination des métaux lourds
Phénylalanine	280 mg	140 %	Antidépresseur naturel, améliore la mémoire, participe à la désintoxication de l'alcool et des drogues
Thréonine	320 mg	64 %	Participe à la formation de l'élastine et du collagène, à la croissance des cartilages et des ligaments, à l'équilibre protéique de l'organisme et au fonctionnement du système nerveux central
Tryptophane	90 mg	36 %	Antidépresseur, anxiolytique, combat la dépendance à l'alcool et aux drogues, augmente la tolérance à la douleur, soulage des migraines et des douleurs dentaires
Valine	400 mg	50 %	Stimulant naturel, il améliore la résistance aux efforts physiques, améliore la glycémie, participe à la régénération et à la réparation des tissus musculaires

Falquet (2006)



Figure 5 : composition nutritionnelle pour 10g de spiruline (Falquet, 2006).

II.2. Valeur nutritionnelle de la spiruline

II.2.1. Les Protéines

II.2.1.1. Quantité, composition

Du point de vue quantité, la teneur en protéines de la spiruline oscille entre 50 et 70 % de son poids sec. Ce sont des valeurs exceptionnelles car les meilleurs sources de protéines végétales n'arrivent qu'à la moitié de ces teneurs. La farine de soja par exemple ne contient que 35 % de protéines brutes (DEOGRATIAS , 2003) .

Tableau VI: rapports d'efficacité protéique comparés, intérêt des complémentations.

Diète	Rapport d'efficacité protéique
spiruline	1,90
Mais	1,23
Riz	2,20
Blé	1,15
Riz + spiruline(3:1)	2,35
Riz + spiruline(1:1)	2,40
Blé + spiruline(3:1)	1,42
Blé + spiruline(1:1)	1,90
Mais + spiruline(3:1)	1 ,80
Mais + spiruline(1:1)	1,72
Mais + avoine +spiruline (3:2:5)	1,90
Mais + riz + spiruline(2:2:1)	1,95

FALQUET (2006)

II.2.1.2. Qualité :

Du point de vue qualitatif, les protéines de la spiruline sont complètes car tous les acides aminés essentiels y figurent (la leucine, Isoleucine, la valine, la thréonine, la cystéine, la méthionine, la phénylalanine, la tyrosine (DEOGRATIAS , 2003).

Les plus faiblement représentés sont les acides aminés soufrés : la méthionine et la cystéine. Mais par complémentation avec une bonne source d'acides soufrés et éventuellement de lysine et/ou d'histidine : les céréales comme le riz, le blé et le millet ou certains oléagineux comme le sésame devraient être d'excellents compléments. Les populations du Tchad qui consomment de la spiruline l'associent au mil qui est spécialement riche en méthionine et cystéine (DEOGRATIAS , 2003).

II.2.1.3. Utilisation protéique nette

Contrairement à d'autres micro-organismes proposés comme sources de protéines (levures, chlorelles...), la spiruline ne contient pas de parois cellulosiques, mais une enveloppe de muréine, c'est-à-dire glucosamines et d'acides uraniques relativement fragile. Ce fait explique la très bonne digestibilité des protéines de la spiruline, Simplement séchée : 83 à 90 % (DEOGRATIAS , 2003).

Ainsi la spiruline ne nécessite ni cuisson, ni traitements spéciaux destinés à rendre ses protéines accessibles. C'est un avantage considérable tant du point de vue simplicité de production que pour la préservation de constituants de hautes valeurs tels que vitamines et acides gras poly insaturés. La valeur de l'utilisation de la spiruline est estimée entre 53 et 61 % soit 85 à 92 % de celle de la caséine (DEOGRATIAS , 2003).

II.2.2. Les lipides

II.2.2.1. Les lipides totaux

Du point de vue quantitatif la teneur en lipides totaux de la spiruline oscille entre 5,6 à 7 %. du poids sec, d'autres sources vont jusqu'à obtenir plus de 11 % de lipides totaux par un meilleur système d'extraction. Ces lipides totaux peuvent être séparés en lipides totaux saponifiables 83 % , surtout composés de monogalactosyl diglycéride et digalactosyl diglycérides 23 % , de sulfoquinovosyl diglycérides 5 % et de phosphatidyl glycérol 25,9 %. Il y a absence phosphatidyl choline et phosphatidyl éthanolamine (DEOGRATIAS , 2003).

Tableau VII :la répartition des acides gras pour deux souches des spiruline.

Répartition des acides gras pour deux souches des spiruline		
Acides gras	Spirulina maxima(% des acides gras)	Spirulina platensis(% des acides gras)
Palmitique(16:0)	63	25,8
Palmitoléique(16:1ω6)	2	3,8
Stéarique(18:0)	1	1,7
Oléique(18:1ω6)	4	16,6
Linoléique(18:2ω6)	9	12
γ-linolénique(18:3ω6)	13	40,1
α-linolénique(18:3ω3)	traces	Traces

DEOGRATIAS (2003)

Les lipides totaux insaponifiables (17%) contenant essentiellement une paraffine, des pigments, des alcools terpéniques et des stérols. Les principaux acides gras de la spiruline sont représentés dans le tableaux (DEOGRATIAS, 2003) .

II.2.3. Les glucides

Glucides : entre 15 et 25% de la matière sèche. Les glucides simples sont en très faible quantité, ce qui est plutôt un avantage sur le plan diététique. La spiruline contient par ailleurs du méso-inositol phosphate, excellente source de phosphore organique. Les polysaccharides de la spiruline présentent de multiples intérêts thérapeutiques, notamment dans la stimulation des mécanismes de réparation de l'ADN, dans son effet radio-protecteur et dans la neutralisation des radicaux libres (Christophe, 2007) .

II.2 .4. Les acides nucléiques

La teneur en acides nucléiques est un point nutritionnel important car la dégradation biochimique d'une partie de leurs composants (les purines : adénine et guanine) produit en dernier lieu de l'acide urique. Or une élévation du taux d'acide urique plasmatique peut produire à la longue des calculs rénaux et des crises de goutte.

Chez *A. Platensis* comme chez *A. Maxima*, on rapporte des valeurs de 4.2 à 6% d'acides nucléiques totaux dans la matière sèche. La teneur en acides nucléiques de la spiruline est très inférieure à celle de la majorité des microorganismes unicellulaires (FALQUET, 1996). Le tableau III donne une idée de la teneur en acides nucléiques totaux de quelques aliments (BERNARD, 2008).

Tableau VIII : teneur en acides nucléiques de quelques aliments

Aliments	Acides nucléiques totaux (% mat. sèche)
Viande de bœuf	1,5
Foie de bœuf	2,2
spiruline	4-6
Levure	23

FALQUET (2006)

II.2.5. Les vitamines

Il existe 13 vitamines, 4 liposolubles (A, D, E, K) et 9 hydrosolubles (B1, B2, B5, B6, B12, C, PP).

La spiruline contient de nombreuses d'entre elles et spécialement des vitamines B dans des proportions optimales (Sébastien, 2008).

II.2.5.1. Vitamines hydrosolubles

Les vitamines constituent le principal facteur impliqué dans les propriétés biologiques des spirulines. Les vitamines identifiées en majorité chez *Spirulina platensis* sont (pour 100g de biomasse) : la vitamine C (42,0-195,3 mg), la vitamine B3 (0,6-5,3 mg), la vitamine B1 (0,8-15,4 mg), la vitamine B2 (0,2-0,9 mg), la vitamine B6 (0,3-4,0 mg), la vitamine B9 (0,2-0,6 mg) et la vitamine B12 (0,3-0,8 mg) (Sébastien, 2008).

Il faut noter que la biomasse poussant en printemps-été montre une proportion en vitamines plus élevée. Ceci dépendant essentiellement des conditions d'ensoleillement (Tableau IX).

Tableau IX : Vitamines hydrosolubles contenues dans la biomasse de *Spirulina platensis* en fonction des saisons (mg/100g de matière sèche)

Vitamines hydrosolubles	Echantillon recueilli en hiver	Echantillon recueilli en automne	Echantillon recueilli en été	Echantillon recueilli au printemps
Acide ascorbique (Vit C)	42,8	42	106,2	195,3
Nicotinamide (Vit B3 ou PP)	5,3	0,6	0,4	0,9
Pyridoxine (Vit B6)	4	0,6	0,3	0,5
Riboflavine (Vit B2)	0,8	0,7	0,9	0,2
Thiamine (Vit B1)	11,6	15,4	0,8	0,8
Cyanocobalamine (Vit B12)	0,4	0,8	0,3	0,3
Acide folique (Vit B9)	0,6	0,4	0,2	0,6

Sébastien (2008)

Concernant la vitamine B9, Sall. et al. (1999) indiquent une valeur allant jusqu'à 100 mg d'acide folique mais ne précisent pas s'il s'agit d'une valeur mesurée chez l'espèce *platensis* ou *maxima* (Sébastien, 2008).

II.2.5.2. Vitamines liposolubles

Les trois vitamines liposolubles trouvées chez la spiruline sont le β -carotène, précurseur de la vitamine A, la vitamine E et la vitamine D (Tableau X).

Tableau X : Vitamines liposolubles contenues dans la biomasse de *Spirulina platensis* (mg/100g de matière sèche)

vitamines	Quantités
β -carotène (provitamines A)	64 à 200 mg /100g
Tocophérol (Vitamine E)	10 à 19 mg/100g
Vitamine D	12000 U soit 0,3 mg/100g

Sébastien (2008)

III .2.6. Les minéraux et oligo-éléments :

Les minéraux spécialement intéressants chez la spiruline sont le fer, le zinc, le magnésium, le calcium, le phosphore et le potassium. La très haute teneur en fer de la spiruline cultivée (550-600 mg/kg) est à souligner doublement du fait que les carences en

fer sont très répandues (anémies ferriprives), surtout chez les femmes (enceintes, allaitantes) et les enfants et que les bonnes sources alimentaires de fer sont rares . (BUJARD, 1970)

Le calcium joue un rôle biologique considérable en particulier dans la constitution des os et des dents mais également les humeurs et les tissus (CLEMENT, 1978).

Tableau XI: Teneur en oligoéléments dans la spiruline

Minéraux	Teneur de spiruline	Doses requises (mg / jour)
Calcium	1300-14000	1200
Phosphore	6700-9000	1000
Magnésium	2000-4000	2500-350
Fer	600-6000	18
Zinc	21-6000	15
Cuivre	8-2000	1,5-3
Chrome	2,8	0 ,5-2
Manganèse	25-37	5
Sodium	4500	500
Potassium	6400-15400	3500
Sélénium	0,01-50	0,05

FOX (1999)

II.2.6. 1 .Calcium

Le calcium est le constituant principal des os (environ 90%) qui est un tissu en perpétuel renouvellement. Son assimilation, nécessite de la vitamine D, des sucres fermentescibles et un rapport équilibré Ca/P et peut être, dans certaines conditions, limitée au niveau intestinal et rénal. Son rôle est capital pour la croissance, la régularisation du rythme cardiaque, le bon fonctionnement du système nerveux ou encore dans l'assimilation de certaines vitamines ou du fer. Mais le phénomène d'acidose peut dégrader considérablement le capital osseux.

La spiruline constitue une excellente source de calcium assimilable pouvant notamment être utilisée dans les cas d'intolérance au lactose ou de personnes consommant peu de produits laitiers (Déborah, 2006) .

II.2.6 .2 Magnésium

Le magnésium est un élément ubiquitaire qui intervient comme co-facteur de presque toutes les enzymes des voies énergétiques, des réactions de phosphorylation-dephosphorylation, il favorise l'absorption du calcium par l'os, module la réactivité au stress, augmente l'activité du système immunitaire et a une action bénéfique sur de nombreux problèmes cardiaques (hypotension, arythmie, infarctus du myocarde...).

Au niveau alimentaire, le magnésium est principalement apporté par le cacao, les légumineuses secs, les eaux minérales et les fruits à coques. La spiruline représente une source naturelle biodisponible pour l'homme très intéressante en magnésium, entre autre par sa teneur en chlorophylle (Déborah, 2006).

II.2.6 .3 Phosphore

L'organisme contient environ 900mg de phosphore, dont 80 à 85% sont situés dans les os et les dents (associés au calcium), le reste entrant dans la composition des phospholipides (un type de graisses), constituants importants des membranes cellulaires.

Il est essentiel à presque toutes les réactions chimiques au sein des cellules, dans le métabolisme des graisses et des sucres, il aide à maintenir l'équilibre acido-basique dans l'organisme et en tant que constituant important de l'ATP, il permet la mise en réserve et la libération d'énergie.

Essentiellement présent dans les aliments riches en protéines, la spiruline en apporte naturellement une quantité non négligeable. De plus, le calcium, le phosphore et le magnésium sont présents dans la spiruline en quantités comparables à celles trouvées dans le lait. Les quantités relatives de ces éléments sont équilibrées ce qui exclut le risque de décalcification par excès de phosphore et en font une source intéressante (Déborah, 2006).

II.2.6. 4 Fer

Le fer est un minéral très répandu dans le corps. Ses rôles sont multiples, de la stimulation du système immunitaire à l'oxygénation du corps. Il a la particularité d'être assez rarement biodisponible dans les aliments d'origine végétale en contenant le plus (céréales complètes).

Cause due bien souvent aux tanins et aux phytates qui empêchent sa métabolisation. La spiruline a un taux de fer élevé qui s'est révélé tant chez le rat (Johnson, 1986 ; Kapoor, 1993b) que chez l'homme (Puyfoulhoux, 2001) d'une très bonne

biodisponibilité. Cette dernière étude montre que le fer de la spiruline est mieux absorbé que celui de la viande, ce qui est exceptionnel pour un fer non-hémique.

Naturellement, la spiruline contient du fer mais l'ajout de sels de fer dans son milieu de culture augmente sa teneur qui peut alors doubler (Déborah, 2006) .

II.2.6.5 Zinc

Le zinc est un oligo-élément qui intervient dans le bon fonctionnement du système immunitaire chez les animaux supérieurs dont l'homme, dans la croissance et le développement cognitif.

Son absorption se fait au niveau de l'intestin grêle et sa biodisponibilité est réduite par l'absorption simultanée de phytates ou de tanins. Les meilleures sources sont en générale les protéines animales.

La quantité de zinc présente dans la spiruline varie d'un échantillon à l'autre et est conditionnée par l'apport de zinc dans la solution nutritive apportée dans les bassins de culture.

Naturellement, la spiruline en contient très peu mais un enrichissement à la culture peut en faire une source intéressante. La biodisponibilité du zinc de la spiruline n'a pas encore testée mais on peut soupçonner, au regard de la bonne biodisponibilité du fer et du magnésium, qu'il en sera de même pour le zinc (Déborah, 2006) .

II.2.6.6 Selenium

Le sélénium est l'oligo-élément antioxydant de référence qui semble agir en synergie avec la vitamine E dans la destruction des radicaux libres. En plus de ce rôle, il a une action importante sur l'immunité, la prévention des maladies cardio-vasculaires, la réduction des rhumatismes et la préservation de la vision.

Les doses de sélénium trouvées naturellement dans la spiruline sont bien en dessous des doses recommandées et d'une très bonne biodisponibilité.. Par contre, des expérimentations d'enrichissement de spiruline ont été effectuées. Il en résulte une spiruline fortement dosée qui pourrait poser des problèmes de surdosage à la consommation (sélénose) mais également une exposition dangereuse pour les ouvriers rajoutant ce sélénium dans les bassins de culture.

Ces techniques sont rarement mises en place et si elles le sont, elles sont signalées par le vendeur (Déborah, 2006) .

II.2.6.7 .Les pigments

La phycocyanine est constituée d'une structure protéique reliée à un chromophore. C'est un pigment assez rare dans la nature qui absorbe la lumière dans une longueur de 61 à 650 nanomètres.

Elle est représentée à environ à hauteur de 10 à 11% en moyenne dans la spiruline.

Appréciée comme colorant bleu naturel dans l'industrie agroalimentaires, de nombreuses recherches sont en cours pour connaître toutes ses propriétés.

Sa structure particulière lui confère des propriétés antioxydantes, antiradicalaires et détoxifiantes. La phycocyanine stimulerait également la production des globules rouges et des globules blancs.

La chlorophylle est un pigment essentiel de la photosynthèse puisqu'elle transforme l'énergie lumineuse en énergie chimique. Constituée d'un atome de magnésium en son centre, la chlorophylle est parfois comparée à l'hémoglobine qui possède quant à elle un atome de fer.

La spiruline en contient environ 1%, ce qui stimulerait les fonctions de presque tous les organes.

Les caroténoïdes sont des pigments non azotés dont la coloration varie du jaune au rouge. La plupart des caroténoïdes sont des provitamines A indispensables aux hommes et aux animaux.

La spiruline en contient entre 20 et 25 fois plus que les carottes. Le bêta carotène représente 80% des caroténoïdes présents.

Les caroténoïdes ont une action anti radicalaire. Ils participent également à la croissance et au développement de l'individu, ainsi qu'au maintien de la vision nocturne (Déborah, 2006) .

II.2.6. 8. Métaux

La recherche des métaux chez les spirulines est réalisée pour l'étude de la toxicité potentielle plus que pour la mesure quantitative en éléments fonctionnels. Cependant, certains métaux comme le sélénium et le chrome sont nécessaires dans l'alimentation à des doses faibles (Sébastien, 2008) .

CHAPITRE III

Conditions de culture de la spiruline et domaines d'utilisation

III.1. La culture de la spiruline

Les cyanobactéries, famille de microorganismes à laquelle on inclut la spiruline, sont des bactéries Gram négative, faisant le même type de photosynthèse que les végétaux supérieurs (Lindblad et al., 1998). Elles colonisent des milieux très divers : eau douce, eau de mer, eau saumâtre, et même en écosystème terrestre. Plusieurs d'entre elles peuvent fixer l'azote atmosphérique : ce sont les espèces à hétérocyste qui pullulent dans les étangs piscicoles riches en phosphate. Certaines sont toxiques. D'autres, qui sont utilisées comme engrais, aliment, source d'énergie ou de produits chimiques présentent un intérêt économique certain.

Comme les cyanobactéries se trouvent à la frontière du monde des végétaux et des bactéries, plusieurs définitions ont été attribuées à la spiruline. En référence, Richmond la décrit comme un microorganisme à filaments bleu-vert, mobiles, composés de cellules cylindriques disposées en trichomes hélicoïdaux. Ces filaments tournent autour de leur axe ; la spiruline n'a pas d'hétérocyste, . Spiruline destinée à la production de petites quantités de proies vivantes elle ne peut donc pas fixer l'azote libre. La forme hélicoïdale du trichome, observable uniquement en milieu liquide est caractéristique du genre, mais les paramètres de l'hélice (épaisseur, longueur) varient selon les espèces, et même chez une même espèce (Richmond, 1986). L'espèce mexicaine *Spirulina maxima* se caractérise par des trichomes de 7 à 9µ de diamètre, de 70 à 80µ de long, légèrement effilés aux extrémités, formant une spirale régulière de 3 à 8 tours et de 40 à 60µ de diamètre. Les cellules constitutantes des trichomes mesurent 5 à 7µ de long et ne rétrécissent pas au niveau des articulations.

L'espèce du Tchad *Spirulina platensis* se compose de trichomes atteignant 350µ de long, de 5 à 11µ de diamètre, un peu rétrécis au niveau des articulations. Les tours de spire ont un diamètre de 20 à 50µ, diminuant légèrement vers les extrémités (Fox, 1999).

III.1 .1.Bases techniques de la production

L'environnement doit comprendre une température convenant à la plante, de la lumière fournissant l'énergie pour la photosynthèse, et de l'eau ; avec en plus, en algoculture, un certain mouvement de l'eau pour assurer une répartition moyenne de la lumière et des éléments nutritifs. Un équilibre acido-basique et un pH favorable à la plante doivent être maintenus.

Un rythme de récolte et d'ajout d'éléments nutritifs doit être établi et la culture doit se faire dans un système ou un bassin convenablement conçu (FOX, 1999).

III.1.2. Facteurs essentiels de la culture**III.1.2.1. Facteurs climatiques**

Les deux paramètres fondamentaux qui contribuent à constituer le climat sont les températures et la pluviométrie. Il ne faut pour autant pas négliger les vents dominants, par exemple le mistral en vallée du Rhône, qui peuvent avoir des conséquences importantes sur l'évaporation d'un bassin de culture, sur la température de l'eau ou la "pollution" de ce bassin par tous les débris et les poussières qu'il peut entraîner.

De même certains éléments comme les haies, la présence de barres rocheuses, de forêts, etc. peuvent entraîner des conséquences importantes sur le microclimat, conséquences qu'il sera bon d'évaluer avant l'implantation d'un bassin... comme d'un jardin potager (Jourdan, 1999).

III.1.2.1.1. Température

Les premiers repères concernant les températures sont à peu près les mêmes que pour l'homme, 37°C : température idéale pour pousser. Au-dessus, c'est trop chaud. En dessous, la vitesse de multiplication baisse avec la température. A 20°C la croissance est pratiquement stoppée. La température du milieu de culture doit donc se situer entre ces deux températures. Plus la "saison" est longue, plus la période de récolte est longue. Les climats continentaux ou d'altitude sont désavantagés. Le handicap d'un climat trop froid peut être compensé artificiellement, comme pour tous les végétaux. La construction de bassins sous serre peut être d'autant plus intéressante que cet abri constitue non seulement une protection contre le froid, l'évaporation, les insectes et les poussières mais aussi contre les pluies diluviennes, comme les orages, qui peuvent faire déborder les bassins et donc provoquer une perte, ou au moins une dilution du milieu de culture (Jourdan, 1999).

III.1.2.1.2. Pluviométrie

La conduite de bassins de culture nécessite un minimum de ressources en eau. Les eaux de pluie sont intéressantes car propres et neutres (pas de minéraux en solution). Sous les climats à faible pluviométrie, ou à saison sèche longue, il peut être nécessaire de prévoir une citerne pour stocker de l'eau de pluie et compenser ainsi l'évaporation des bassins. Là encore, il faut un "juste milieu". Les excès de précipitations devront être prévus en construisant des bassins plus profonds ou en les protégeant. Le manque d'eau est évidemment rédhibitoire. La carence en eau de pluie peut être compensée par l'utilisation d'eaux de provenances diverses, et plus ou moins "chargées" (rivière ou fleuve, nappe phréatique, eaux usées...). Il faudra alors tenir compte de la qualité de l'eau dans la mise au point, puis l'entretien du milieu de culture.

La présence d'une couverture translucide au-dessus des bassins pour éviter une dilution du milieu de culture est une bonne solution dans les régions à fortes précipitations (Jourdan, 1999).

III.1.2.2. Autres facteurs

III.1.2.2.1. Lumière

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

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

- * Agiter suffisamment la culture pour que les filaments individuels ne restent pas plus d'une demi-minute à la surface en plein soleil, mais plongent et remontent fréquemment. Les « roues à aubes » constituent les systèmes d'agitation les plus utilisés; le but est de remuer l'eau et non de créer un dénivellement comme on le croit généralement (FOX, 1999).

L'agitation Il est impératif d'agiter, au moins occasionnellement (2-4 fois par jour), une culture de spiruline. On favorise ainsi une dispersion homogène de la spiruline dans le liquide, et son exposition à la lumière. Une agitation trop violente endommage la spiruline (fragments visibles au microscope) et provoque l'apparition de mousse. Certaines pompes centrifuges, ainsi que les chutes d'eau avec éclaboussures, sont spécialement néfastes. Le module proposé assure l'agitation continue de la culture par une petite pompe électrique

Pour de petits volumes de culture (moins de 100 litres), une agitation continue par injection d'air peut être réalisée au moyen d'un petit compresseur pour aquarium. Cette dernière méthode est très pratique pour la conservation d'une culture de secours (Jourdan, 1999).

III.1.2.2.2. Salinité

Les limites de salinité et d'alcalinité permises, sont généralement assez larges, mais on se place souvent vers les minima, cela pour des raisons d'économie et de productivité, avec une salinité totale de 13 g/l ; lorsque le carbone est apporté par le bicarbonate, on doit travailler à forte alcalinité pour réduire le volume des purges (JOURDAN, 1999).

Le sel de cuisine iodé et fluoré peut convenir mais souvent il contient jusqu'à 2 % de magnésium insoluble. Par contre l'emploi d'un sel peu raffiné est recommandé à cause de sa teneur en oligo-éléments. Si le sel apporte trop de magnésium, il y aura floculation de sels minéraux insolubles, surtout à pH assez élevé, ce qui peut être très gênant pour une culture qu'on ensemence peu concentrée en spiruline : celle-ci est en effet facilement entraînée par les floculants et tombe au fond sans que l'on puisse la récupérer (JOURDAN, 1999).

III.1. 2.2.3. pH

Pour aboutir à une bonne croissance de la spiruline, le milieu de culture doit présenter un degré d'alcalinité situé entre 8,5 et 10,5. plus de détail

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 10 : s'il est trop bas la culture risque de mal démarrer, avec formation de grumeaux ou précipitation de la spiruline au fond.

Par contre s'il doit servir d'appoint à une culture existante son pH peut être avantageusement voisin de 8, ce qui contribue à maintenir le pH de la culture suffisamment bas par apport de bicarbonate. C'est typiquement le cas des bassins en cours d'extension ("à géométrie variable" (Jourdan, 1999).

III.1.3. Bassins de culture

Pour une production familiale ou artisanale on peut se contenter de bassins de petite taille, sans agitation à roue à aube, sans chicane médiane. Il y a alors de nombreuses façons de construire un bassin adéquat, variables selon les conditions locales Jean-Paul Jourdan, 1999

Il existe plusieurs types des bassins parmi elles on a :

- Bassins à bâche plastique :

La bâche plastique doit avoir au minimum une épaisseur de 0,5 mm. Elle doit être de préférence de qualité alimentaire et résistante aux rayons ultraviolets (KASONGO, 2003).



Figure6 : Bassin en tissu polyamide enduit PVC, Ecopark, Madurai, Tamil Nadu (Inde), 18 m², 1998 (Jourdan, 1999).

- Bassins en dur

Le fond d'un bassin en ciment doit être construit sous forme d'une dalle en béton armé de 10 cm d'épaisseur minimum, de très bonne qualité, sur terrain bien compacté. Les bords du bassin peuvent être en briques, en parpaings ou en béton armé (KASONGO, 2003).



Figure7 : Bassin en dur, Tamil Nadu (Inde), 1 m², 1996 (Jourdan, 1999).

- Bassins en argile :

Creuser sur 20 cm et faire un talus bien tassé de 20 cm également, le tout en pente douce. Si le terrain n'est pas naturellement argileux, garnir la surface d'une couche d'argile humide de bonne qualité, de 3 à 5 cm d'épaisseur, bien tassée pour éviter les fissures. Garnir les rebords de tuiles ou briques cuites, ou de plastique pour éviter les fissurations lors des baisses de niveau.

La spiruline pousse remarquablement bien dans un bassin en argile, mais sa pureté bactériologique doit être surveillée de plus près (risques accrus de présence de microorganismes anaérobies au fond). L'étanchéité n'est pas complète, mais elle peut être améliorée avec un film plastique même très mince (KASONGO, 2003).

III.1.4 . Milieu de culture

La spiruline pousse dans une eau à la fois salée et alcaline. L'eau utilisée pour le milieu de culture doit être de préférence potable (toutefois sans excès de chlore à défaut de tuer les algues) ou au moins filtrée, le plus important étant l'élimination des algues étrangères. Une eau dure produira des boues minérales (plus ou moins abondantes selon la teneur en calcium, magnésium et fer), qui décantent rapidement et n'encombrent pas particulièrement la culture, à condition que l'ensemencement initial en spirulines soit assez concentré.

La composition des milieux de culture peut varier énormément, selon la disponibilité des produits chimiques nécessaires à leur élaboration (JOURDAN, 1999). Le tableau VIII donne la composition chimique d'un milieu de culture typique (FOX, 1999).

Tableau XII : Analyse d'un milieu de culture typique

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

FOX (1999)

III.1.5. Ensemencement

III.1.5.1. choix de la souche

Il existe des spirulines de "races" (souches) différentes, bien qu'elles aient toutes des caractères communs qui les distinguent des autres algues. On reconnaît très vite au microscope ou même à la loupe de fort grossissement (25 fois) si les spirulines sont spiralées ou droites mais il est moins facile de dire de quelle souche, car les spirulines ont une forte tendance à changer de taille et de forme (spiralée plus ou moins serrée, ondulée ou droite). Un trop fort pourcentage de droites conduit à des difficultés de récolte.

Donc, il faut prendre de préférence une semence 100 % spiralée, de grande taille, d'un beau vert tirant vers le bleu-vert, filtrant facilement. Pour ensemercer il suffit de transvaser dans du milieu de culture neuf, un certain volume de culture provenant d'un autre bassin en production jusqu'à ce que la couleur devienne verte (JOURDAN, 1999).

III.1.5.2. Mesure de la concentration d'une culture de spiruline :

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

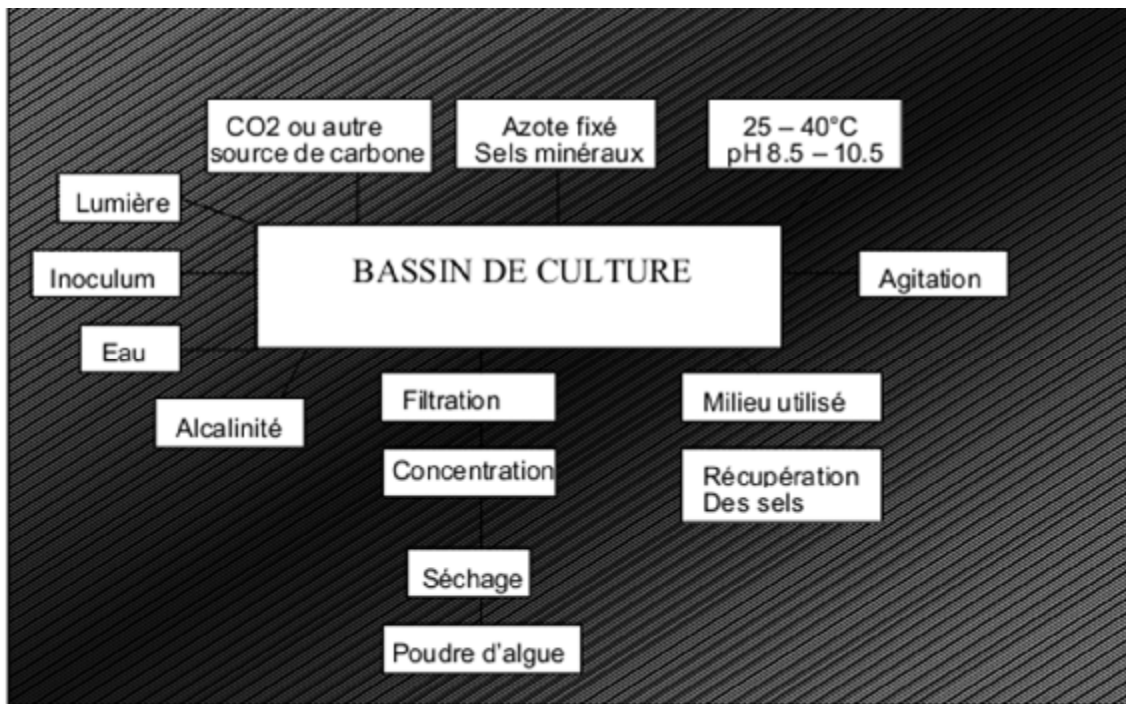


Figure 8 : Diagramme récapitulatif des paramètres de culture et de traitement de la spiruline (ELYAH, 2001 – 2003).

III.1.6. RECOLTE :

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 si le beau temps n'est pas assuré l'après-midi). La filtration sous plein soleil est fortement déconseillée car la biomasse sur les bords du filtre devient rapidement brune et salit la toile de filtration. Par temps couvert cette obligation de récolte tôt le matin est évidemment moins impérieuse, et par beau temps on peut toujours ombrer le filtre. Quelque soit le temps, si l'on opère en plein air, il faut couvrir le filtre pour éviter que la biomasse récoltée ne se salisse. Quand cela est possible il est très avantageux d'aménager un poste de récolte à l'abri du soleil et des poussières, de préférence dans un bâtiment (Jourdan, 1999).



Figure 9 : Récolte de Spiruline en salle après pré-concentration (A) et récolte directe sur le bassin de culture (B) (TSARAHEVITRA, 2005).

III.1.7. SECHAGE :

Le séchage est le seul moyen sûr de conserver et de distribuer la spiruline sans chaîne de froid. 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) ; attention à ne pas congeler et à éviter les retombées de gouttes d'eau condensée sur la biomasse en cours de stockage. En chambre froide à 1°C la biomasse peut se conserver jusqu'à une semaine. La biomasse lavée ne peut se conserver, même au réfrigérateur (Jourdan, 1999) .



Figure 10 : Extrusion de biomasse pressée, avec pistolet à silicone Sika, sur un plateau de séchoir électrique 1998(Jourdan, 1999) .

III.2. Domaines d'utilisation

La très grande richesse de la composition chimique de la Spiruline lui confère un large potentiel d'utilisations. Outre dans le domaine de la malnutrition, elle est utilisée dans des domaines variés. Elle est vendue dans les parapharmacies et les magasins de produits biologiques pour : équilibrer une alimentation par ses apports en micro-nutriments ; réguler les surcharges pondérales par sa richesse en protéines et phénylalanine ; améliorer les capacités sportives par ses teneurs en fer, vitamine B12 et β -carotène ; lutter contre l'asthénie par son apport en oligoéléments et vitamines ; freiner le vieillissement cellulaire par les propriétés antioxydantes du β -carotène, de la phycocyanine et de la vitamine E ; diminuer le cholestérol grâce aux acides gras polyinsaturés et à la vitamine E. Des études ont été faites sur son action anti-inflammatoire, dans la prévention de l'athérosclérose, sur la diminution du diabète. Elle est utilisée en aquariophilie et en aquaculture pour favoriser la croissance des poissons et des crevettes, renforcer les défenses immunitaires des poissons d'élevage, améliorer la fertilité et stimuler la coloration des poissons d'ornement tels le *Xiphophorus helleri* . Dans l'industrie agroalimentaire, elle est vendue pour la nutrition des animaux (chats, chiens, chevaux, vaches et taureaux) mais aussi dans l'alimentation humaine comme colorant naturel (chewinggums, sorbets, sucreries, produits laitiers, boissons). La phycocyanine est un des rares pigments naturels de couleur bleue. En cosmétologie, elle est utilisée dans les masques cryogéniques et crèmes anti-âge, par son action sur le renouvellement cellulaire. Dans le cadre du programme MELISSA, l'agence spatiale

européenne s'est intéressée à la Spiruline qu'elle intégrerait dans un écosystème artificiel fermé dans le compartiment photoautotrophe, d'une part pour équilibrer la ration alimentaire, d'autre part pour régénérer l'atmosphère par photosynthèse (Loïc *et al*, 2003).

III.2.1 . Utilisations sanitaires de la spiruline

Des essais précliniques récents ont démontré ses propriétés thérapeutiques, notamment, immunologique, hypocholestérolémiant, antivirale et antimutagène (ANONYME, 2007) .

Le but de cette partie du document est de s'intéresser aux bienfaits pour la santé que peut apporter une cure ou une prise régulière de spiruline.

A ce titre, des études scientifiques ont démontré les effets sur le système immunitaire, le cancer, le virus du sida, le virus de l'herpes (ANONYME, 2007) .

III.2.1.1. Cholestérolémie

Parmi les 1ères causes de mortalité en Occident, les maladies cardio-vasculaires proviennent d'une alimentation trop riche en sucre, en sel, du stress, de l'alcool, du tabac et du manque d'exercice. Après 40 ans, le cholestérol en excès se dépose dans les artères (athérosclérose) puis les vaisseaux se durcissent (artériosclérose). Certains aliments jouent un rôle protecteur comme l'ail, le yaourt, les céréales complètes, la pectine de fruits, les poissons gras.

La spiruline avec son fort taux de gamma linoléique permet d'abaisser le taux de cholestérol de 4,5% dont 6% de mauvais cholestérol avec une prise quotidienne de 4g pendant 8 semaines.

La société DainipponInk&Chemicals estime que cette réduction est due aux facteurs suivants : forte teneur en chlorophylle (1,1g pour 100g), acides gras poly-insaturés gamma linoléique (1g pour 100g), fibres (8g pour 100g), acide nicotinique, rapport très bas entre lysine et arginine (0,67) (ANONYME, 2007).

III.2.1.2. Cancer

2nde cause de mortalité en Occident, on estime que le tabac est responsable de 35% des mortalités par cancer et que la surnutrition en graisses est la cause de 60% des cancers chez la femme et 40% chez l'homme. Aussi il est recommandé de consommer peu de viandes animales, charcuterie, fromage, mais au contraire des céréales complètes, des légumineuses, des fruits et des légumes frais, principalement ceux ayant des feuilles d'un vert soutenu ou une chair jaune, autrement dit ceux qui sont riches en bêta-carotène. L'effet protecteur du bêta-carotène sur les cancers du poumon, de la gorge, de l'estomac, du côlon, du sein et de

l'utérus a été largement démontré par de très nombreuses études. Il est également démontré qu'outre l'effet cancérigène direct du tabac, celui-ci inhibe également partiellement l'utilisation du bêta-carotène. De nombreuses expériences sur la spiruline ont été conduites dans ce domaine.

A l'école de médecine dentaire d'Harvard, des applications de bêta-carotène sur les cancers de la bouche de hamsters ont permis de réduire voire faire disparaître les cancers. D'autres expériences ont permis de démontrer que des hamsters nourris avec de la bêta-carotène provenant de la spiruline et exposés à des substances cancérigènes ne développaient pas de cancer, alors qu'un autre groupe ne recevant pas de bêta-carotène développait le cancer.

Une étude japonaise a également mis en évidence l'effet protecteur de la phycocyanine (15% du poids). Des souris atteintes d'un cancer du foie ont vu leur survie augmenter significativement par rapport au groupe témoin. Une augmentation lymphocytaire a également été constatée. Cet effet est intéressant pour les personnes qui subissent des radiothérapies et des chimiothérapies. 3g de spiruline par jour freine les pertes de leucocytes, réduit les nausées et la fatigue générale.

Des expériences au Japon sur des rats, montrent que la spiruline réduit la toxicité pour les reins de certains médicaments lourds, comme ceux utilisés en chimiothérapie (ANONYME, 2007).

III.2.1.3. Anémie

Due à une diminution de la concentration en hémoglobine du sang, elle peut être liée à un manque de fer, carence la plus répandue dans le monde, problème majeur de santé publique. Les enfants, les femmes et les personnes âgées sont les plus touchés. Le fer constitue le cœur de la molécule d'hémoglobine, assurant le transport du dioxygène aux cellules par les globules rouges. La spiruline contient plus de fer que tout autre aliment, et est 3 fois plus assimilable que celui contenu dans les légumes et la viande.

A l'université de Tokyo, une étude a démontré qu'en donnant 4g de spiruline par jour pendant 30 jours à des femmes anémiées suite à des cures d'amaigrissement, le sang avait récupéré 21% d'hémoglobine en plus (ANONYME, 2007).

III.2.1.4. Néphrites

A l'université de Cuba, l'administration de spiruline à des rats (30% de leur ration alimentaire) ayant reçus un dérivé du mercure, un antalgique, un antibiotique et un anti-cancer, a mis en évidence une diminution importante de l'urée, de la créatinine et l'amélioration physiologique de leurs reins (ANONYME, 2007).

III.2.1.5. La spiruline contre le VIH :

D'après l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) il y a dans le monde en voie de développement 6 millions de personnes infectées par le virus du SIDA qui pour survivre ont besoin de la thérapie anti-rétrovirale hautement active (HAART). Or seulement 400 000 d'entre elles y ont accès. Après de nombreuses années d'indifférence à cette pandémie, les compagnies pharmaceutiques commencent seulement à proposer ces anti-rétroviraux à des prix convenables. L'OMS s'efforcera de fournir la thérapie anti-rétrovirale à 3 millions de personnes pour l'année 2005. Néanmoins 5 millions de personnes ont été récemment infectées par le SIDA et 3 millions d'entre elles meurent chaque année. Cette sinistre réalité appelle à la mise en œuvre de tous les moyens possibles pour combattre la pandémie.

Le rôle des aliments et des compléments alimentaires comme stratégie naturelle thérapeutique dans la prévention et l'atténuation du SIDA a été très peu étudié. Cette communication met en évidence le rôle de la Spiruline (*Arthrospira*) dans la prévention, l'atténuation, la diminution de la progression de la maladie et toute amélioration de la qualité de vie des personnes affectées par le virus du SIDA (Loïc, 2004).

La spiruline de part sa teneur en protéines, provitamines A et oligoéléments constitue un soutien nutritionnel non négligeable pour les PvVIH (Nikiéma *et al*, 2009).

Le rôle des aliments et des compléments alimentaires comme stratégie naturelle thérapeutique dans la prévention et l'atténuation du SIDA a été très peu étudié. Cette communication met en évidence le rôle de la Spiruline (*Arthrospira*) dans la prévention, l'atténuation, la diminution de la progression de la maladie et toute amélioration de la qualité de vie des personnes affectées par le virus du SIDA.

Il apparaît dans la littérature que la Spiruline régule favorablement le système immunitaire en augmentant l'activation macrophage, l'activité des cellules T et l'activité des cellules naturellement destructrices. Il a aussi été démontré que la Spiruline augmente la production de gamma interféron, ce qui peut éventuellement rendre les virus inactifs, que l'eau extraite de la Spiruline avait une activité antivirale contre notamment le virus humain immunodéficient (I-HIV-I) et que le virus simplex de l'herpes (BSV-1). Les polysaccharides sulfatés poly anioniques de la Spiruline sont aussi des candidats potentiels aux microbicides anti-HfV. ÎLE (LOIC., NARDO, 2004).

III.2.1.6. Effets contre l'hyperlipidémie

Le premier rapport sur la réduction du cholestérol sanguin par la Spiruline a été réalisé sur des rats par Devi et Venkataraman en 1983. Depuis, plusieurs chercheurs ont

confirmé ces hypothèses par des expérimentations sur l'homme. En 1984, Kato et al. ont démontré que le taux de cholestérol diminuait lorsque l'alimentation était complétée de 16% par de la Spiruline. Dans une étude réalisée sur des rats en 1987, Iwata et al. ont montré qu'une alimentation enrichie à 5, 10 et 15% de Spiruline engendrait une diminution significative du cholestérol total, des triglycérides et des phospholipides. Sur les essais réalisés sur l'homme, on a remarqué qu'un régime régulier à la Spiruline de 4,2 g / jour pendant 4 semaines engendrait une diminution du cholestérol et une baisse significative de dépôts graisseux dans les artères. Cependant, si l'administration de Spiruline est discontinuée, le taux de cholestérol reprend sa valeur de départ.

Ce phénomène serait dû à l'augmentation de l'activité d'une enzyme, la lipoprotéine lipase, enzyme clé dans le métabolisme des triglycérides et des lipoprotéines (Belay *et al*, 1993).

III.2.1.7. Effets protecteurs contre les radiations

D'après Schwartz et al. , les molécules protectrices présentes dans l'extrait de Spiruline agissent comme facteurs stabilisants de l'ADN. On observe alors une diminution des micronucléus induits par les rayons γ . Des expériences conduites sur des enfants victimes de Tchernobyl auxquelles on a administré de la Spiruline pendant 45 jours, ont montré une augmentation des cellules-T suppresses et d'hormones. La radioactivité de leurs urines a diminué de 83% (Belay *et al*, 1993).

III.2.1.8. Effets contre la toxicité des reins

D'après Yamane et al. en 1988, les rats ayant une forte teneur en mercure montrent des urines riches en azote et un serum riche en créatinine, indicateurs d'une infection des reins.

L'ajout de 30% de Spiruline dans le régime alimentaire fait diminuer les taux de ces indicateurs, par l'intermédiaire de la diminution de l'activité de certaines enzymes (alcaline phosphatase et glutamic-oxalo-acétate transaminase). Il est suggéré que la phycocyanine serait responsable de cette diminution d'activité et donc de la détoxification des reins (Belay *et al*, 1993).

III.2.1.9. Effets sur la flore intestinale

Tsuchihashi a montré en 1987 que l'ajout de 5% de Spiruline dans l'alimentation augmentait de 3 fois la population des Lactobacillus des intestins de rats. Chez les humains, les Lactobacillus sont connus pour leurs 3 fonctions majeures : ils facilitent la digestion et

l'absorption des nutriments, protègent contre les infections et stimulent le système immunitaire. Chez les malades du SIDA, une mauvaise absorption des aliments associée à un terrain opportun aux infections ne font qu'augmenter l'expression des symptômes de la maladie. C'est pourquoi un complément en Spiruline est recommandé pour maintenir la population de *Lactobacillus* et ainsi ralentir la progression du virus (Belay *et al*, 1993).

III.2.1.10. Effets contre le diabète, l'obésité et l'hypertension

A l'université de Tokyo, la prise de 5g par jour a mis en évidence une amélioration et un meilleur contrôle du diabète (ANONYME,2007).

D'après Takaï et al (1991), la fraction soluble dans l'eau de la Spiruline a la propriété de diminuer l et aux de glucose dans les érum .Parailleurs, Becker et al. ont montré en 1986 qu'un complément en Spiruline de 2,8 g / 3 fois / jour pendant 4 semaines entraînait une réduction du poids corporel chez les obèses. Iwata et al. (1990) ont remarqué une suppression de l'hypertension chez les rats, suite à un apport de Spiruline (Belay *et al*, 1993).

Tableau XIII: Tests cliniques qui présenter l'effet de la spiruline sur autre maladies

La maladie	Diagnostic clinique
Allergies, Asthme	Tests cliniques indiquant une amélioration importante. complément d'information de la spiruline
Pancréatite	Tests cliniques indiquant un effet favorable. complément d'information de la spiruline
Cataracte	Tests cliniques indiquant un retour à la vision. complément d'information de la spiruline
Ulcères à l'estomac dus au stress	Expériences sur des rats montrant une efficacité préventive et curative. complément d'information de la spiruline

(ANONYME,2007)

III.2.1.11. Spiruline et femmes

Les maladies de la femme, bénignes ou dramatiques, tel que l'indisposition menstruelle, le cancer du sein ou de l'utérus en passant par les risques d'anémie... sont dues majoritairement à un déséquilibre hormonal, par carence d'acides gras essentiels et à une diminution du taux de fer. La spiruline en cure régulière présente un intérêt dans les deux

domaines. Pour les femmes enceintes et celles qui allaitent, la prise régulière de spiruline est également recommandée (GUSTAVSON et *al*, 2000).

III.2.1.12. Spiruline et régime

Par sa richesse et son équilibre, la spiruline est employée lors de régimes amaigrissants pour éviter les carences. C'est une des plus grandes sources de phénylalanine, un coupe faim très en vogue ces dernières années (GUSTAVSON et *al*, 2000).

III.2.1.13. Spiruline et végétarisme

La spiruline est l'alliée idéale des végétariens en tant que source de vitamine B12, unique dans le règne végétal, et de fer. L'absence de ces deux ingrédients compromet parfois la vitalité des végétariens. La spiruline est d'un apport protéique important. Dans le cadre d'un régime végétalien strict, elle fournit la lysine et la méthionine, 2 acides aminés essentiels absents dans les protéines végétales (GUSTAVSON et *al*, 2000).

III.2.1.14. Spiruline et les sportifs (L'augmentation de la VO2 max)

De nombreux sportifs de haut niveau utilisent la spiruline pour améliorer leurs performances, sous le suivi de médecins et de préparateurs physiques. Les équipes olympiques cubaine et chinoise l'utilisent au cours de leur préparation (GUSTAVSON et *al*, 2000).

La structure chimique intime de la phycocyanine, ce pigment bleu « cyan » spécifique de la spiruline, est quasi identique à celle de l'érythropoïétine, le cœur du globule rouge. D'où la capacité exceptionnelle liée à la récupération lors des efforts en aérobiose.

VO2 max Il existe une relation directe entre l'activité physique d'un individu et sa consommation en oxygène, dite « VO2 ». Le sportif de compétition est soumis régulièrement à des tests d'effort au cours desquels sont mesurées ses concentrations en oxygène et en dioxyde de carbone dans l'air expiré, afin de déterminer notamment la consommation maximale d'oxygène que son métabolisme peut atteindre. Ce débit maximal d'oxygène est appelé « VO2 max », et constitue la limite théorique que l'organisme ne peut atteindre, voire dépasser, sans risques. L'entraîneur va, par exemple, demander à son poulain de travailler à 80 % de sa VO2 max.

Ce débit maximal dépend de plusieurs facteurs :

- un facteur génétique, immuable ;

- des facteurs intrinsèques qui, eux, peuvent s'améliorer par le biais d'un entraînement spécifique bien conduit, ainsi que par des apports micro-nutritionnels pertinents...notamment ceux, très complets, contenus dans la spiruline (DENIS, 2011).

III.2.2. *Spirulina platensis* et l'industrie pharmaceutique

L'industrie pharmaceutique, toujours en quête de nouvelles molécules, a été l'une des pionnières à observer la nature, à l'utiliser et à la copier. Plus de 60% des anticancéreux et 70% des antibiotiques utilisés aujourd'hui dérivent de produits naturels. Aujourd'hui la recherche de nouvelles molécules apportant un réel bénéfice thérapeutique est de plus en plus difficile et coûteuse.

Les grands laboratoires pharmaceutiques ont besoin de trouver des molécules innovantes qu'ils pourront protéger par des brevets pendant plusieurs années et sur lesquelles ils pourront avoir un retour sur investissement rapide et de longue durée. C'est pourquoi, la tendance est aux médicaments biotechnologiques ou nano technologiques dérivés de la biologie moléculaire permettant le développement de molécules à action ciblée pour une réelle avancée thérapeutique.

La spiruline en tant que telle n'intéressera pas les industries pharmaceutiques car, malgré ses propriétés démontrées comme anti-inflammatoire, elle n'apporte pas de réelle avancée thérapeutique et ses effets sont surtout préventifs et non curatifs. Néanmoins, l'étude du mode *Spirulina platensis* et ses constituants : intérêts nutritionnels et activités thérapeutiques (Sébastien, 2008).

III.2.3. *Spirulina platensis* et l'industrie cosmétique

On entend par "cosmétique" tout produit destiné à être mis en contact avec les parties superficielles du corps humain (épiderme, systèmes pileux et capillaire, ongles, lèvres, organes génitaux externes, dents), en vue de les nettoyer, de les parfumer, d'en modifier l'aspect, de les protéger, de les maintenir en bon état ou de corriger les odeurs corporelles. (Code de la Santé publique, article L.5131-1). Peu de produits à base de spiruline et à visée cosmétique existent actuellement sur le marché. Seules quelques crèmes à base d'algue spiruline existent mais leur démonstration d'efficacité n'est basée que sur les publications scientifiques étudiées ultérieurement à savoir sur les propriétés de la spiruline utilisée par voie orale. A l'heure actuelle, aucune étude n'a été réalisée pour mesurer la biodisponibilité par la peau des molécules actives de la spiruline. Néanmoins, comme pour tous les produits cosmétiques, avant d'être proposés au consommateur, ils doivent faire l'objet d'un "dossier",

dossier qui est en permanence tenu à la disposition des Autorités Sanitaires, notamment de l'Agence Française de Sécurité Sanitaire des Produits de Santé (AFSSaPS) et du Service de la Répression des Fraudes (DGCCRF). Par ce dossier, l'industriel qui souhaite commercialiser un produit cosmétique assure qu'il a vérifié que *Spirulina platensis* et ses constituants : intérêts nutritionnels et activités thérapeutiques (Sébastien, 2008).

La spiruline contribue à ralentir le vieillissement de la peau grâce à ses molécules anti-oxydantes (acide gamma-linoléniques, phycocyanine, tocophérol, carotène, sélénium et zinc) qui empêchent la formation de radicaux libres. De plus, les acides gamma-linoléniques apportent souplesse, élasticité, et donc douceur à l'épiderme.

D'autre part, la spiruline concentre également tous les nutriments et oligo-éléments nécessaire à la brillance et à la résistance des cheveux et des ongles, ainsi que de nombreuses vitamines qui permettent de retrouver fraîcheur et santé (FALQUET, 2006).

III.2.4. *Spirulina platensis* et l'industrie alimentaire

Depuis près de 10 ans, la spiruline a déjà été référencée dans de nombreux produits et formes galéniques différents (comprimés, gélules, poudre...). Parfois appelés à défaut « cosmétique par voie orale », ces produits vantent les mérites de l'algue aux milles vertus sans pour autant avoir fait l'objet d'études scientifiques. Comme pour les cosmétiques, les industriels se fondent sur les nombreuses études dont la spiruline a fait l'objet. Cependant, comme illustré dans les paragraphes précédents, la spiruline et ses constituants ont réellement été testées *in vivo*, la transposition d'activité est donc possible, seule reste à démontrer que la dose active pour l'effet escompté a été atteinte.

Aujourd'hui, la quasi-totalité des compléments alimentaires à base de spiruline sur le marché ont comme indication de traiter la fatigue ou d'apporter une supplémentation protéique.

Ces indications utilisent seulement les propriétés nutritionnelles de l'algue à savoir sa composition riche en protéines et en vitamines (Sébastien, 2008) (La spiruline est l'un des végétaux connus les plus riches en protéines (60-70%). , 15 g de spiruline contiennent autant de protéines que 100 g de viande.) (Mahamat, 2003). Aucun ne fait part des propriétés thérapeutiques.

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

Dans le décret 2006-352, publié au Journal Officiel de la République Française le 20 mars 2006 : "on entend par complément alimentaire, les denrées alimentaires dont le but est

de compléter le régime alimentaire normal et qui constituent une source concentrée de nutriments ou d'autres substances ayant un effet nutritionnel ou physiologique seuls ou combinés, commercialisés sous forme de doses destinées à être prises en unités mesurées de faible Spirulinaplatensis et ses constituants : intérêts nutritionnels et activités thérapeutiques (Sébastien, 2008).

III.2.4.1. Alimentation animale

La spiruline, notamment de second choix (grumeaux, balayures), peut se valoriser dans l'alimentation des animaux (poules pondeuses, poulets, vaches, chevaux de course, poissons, crustacés, larves de crevettes, etc.). Elle améliore leur santé, leur apparence, leur qualité ou leurs performances. Pour les poissons, elle peut être donnée en l'état, fraîche ou sèche ou, mieux, être incorporée aux granulés. Pour les poules, on peut ajouter jusqu'à 10 % de spiruline dans la ration.: la qualité des œufs est améliorée (jaune plus coloré) (Jourdan, 1999).

III.2.4.2. Alimentation humaine

La spiruline ne remplace pas les aliments caloriques tels que le manioc, le riz, le blé, la pomme de terre ou le maïs, mais c'est un ingrédient idéal de la sauce protéinée qui accompagne la "boule" africaine, par exemple, apportant non seulement ses protéines, mais de nombreux autres éléments très favorables à la bonne santé de tous et notamment des petits enfants.

Mille mélanges et recettes peuvent être inventés pour consommer la spiruline crue ou cuite, fraîche ou sèche, de manière agréable. Il n'est pas exagéré de prétendre pouvoir faire de la très bonne gastronomie à base de spiruline de qualité, surtout fraîche.

La spiruline séchée en spaghetti est généralement préférée par les consommateurs au produit industriel séché à l'atomiseur ("spray drier"), tant pour sa consistance physique que pour son odeur. La présentation sous forme de spaghetti non ou peu broyés plaît généralement beaucoup, mais n'est pas pratique pour l'emballage et le stockage (Jourdan, 1999).

III.2.4.3.Cuisiner la spiruline

La spiruline, souvent rencontrée sous forme de poudre déshydratée, s'ajoute à l'alimentation habituelle. Ajoutée à un jus d'orange, elle se saupoudre sur la salade, se mélange au yaourt, confiture ou miel, s'accommode dans les sauces vinaigrettes, dans le guacamole ou tout simplement sur les plats après cuisson. Chacun peut cuisiner la spiruline à son goût, pourvu qu'elle ne soit pas cuite ce qui lui ferait perdre de sa vitalité (enzymes et vitamines thermosensibles) (GUSTAVSON *et al*, 2000).

III.2.4.4.Malnutrition

Faim, famine ou malnutrition? Il est indispensable de distinguer chaque terme. La faim se caractérise par un manque d'apport calorique mais pas nécessairement par un manque de qualité de nourriture. La famine est liée à un manque quantitatif de nourriture à grande échelle pendant une période assez longue. Alors que la malnutrition est essentiellement due à la faible valeur qualitative des aliments absorbés n'apportant pas tous les éléments nécessaires à la santé (sucres, lipides, protéines, acides gras essentiels, vitamines, minéraux, ..) (ANONYME, 2007).

la malnutrition entraîne chez le jeune enfant de nombreuses conséquences néfastes : augmentation du risque de mortalité, diminution des défenses immunitaires, retard du développement moteur, diminution des capacités cognitives et d'apprentissage à l'école (Christophe., Denis, 2011).

Dans les pays dits développés, la malnutrition est tout aussi possible par des apports excessifs ou déséquilibrés de certains nutriments.

Selon les Nations Unies, 250 millions d'enfants sont malnutris, et 74% de la mortalité des enfants de moins de 5 ans est due à la malnutrition. Par ailleurs il est intéressant de relever que la malnutrition légère ou modérée conduit au ¾ des décès, ce qui conduit les chercheurs de l'université de Cornell aux USA à dire que les programmes nutritionnels doivent s'intéresser prioritairement à cette population, sujette à de nombreuses maladies et infections, à des retards de croissance et du développement mental.

200 millions d'enfants ont un déficit pondéral, 230 millions ont un retard de croissance, 50 millions sont émaciés. La carence en vitamine A est un grave problème de santé publique dans plus de 60 pays. 30% de la population mondiale est carencée en iode, 2 milliards de personnes sont carencées en fer. Au Brésil, 20% des enfants sont malnutris, la moitié des femmes souffrent de carences alimentaires, en Suisse 14% de la population souffre de carences nutritionnelles, pour 8% des enfants et adolescents en France. Aux USA, 1 enfant sur 3 souffre de malnutrition (ANONYME, 2007).

L'essentiel des carences graves proviennent du manque de vitamine A, du fer et de l'iode. La spiruline est une bonne réponse à ces carences, 2 à 4g suffisent à couvrir les besoins quotidiens en zinc, fer, vitamine A et acides gras essentiels chez l'enfant.

De la naissance à l'âge de 4 mois, ces besoins sont couverts par le lait maternel, au delà une alimentation complémentaire est rendue nécessaire pour apporter les nutriments énergétiques (sucres ou glucides, matières grasses ou lipides), les nutriments bâtisseurs (protéines), et les nutriments protecteurs (vitamines et minéraux).

Tous ces nutriments doivent être apportés simultanément pour garantir leur efficacité. Diverses organisations ont fait le choix d'intervenir dans la prévention de la malnutrition infantile.

Cette prévention est notamment basée sur l'éducation nutritionnelle des populations, le développement et la consommation de produits cultivables localement et la mise à disposition d'aliments de complément (Christophe., Denis, 2011).

La FAO constate que peu de pays, ayant des ressources insuffisantes par rapport à leurs besoins alimentaires, peuvent satisfaire leurs besoins par des récoltes de nature conventionnelle (Goupille, 1985). Cette situation a fait germer l'idée de se tourner vers des sources alimentaires non conventionnelles comme les algues et plus précisément les micro algues (Jourdan, 1999).

Sur la base de sa composition en micronutriments, de son potentiel pour la santé et du fait qu'elle soit cultivable localement, la spiruline présente des avantages majeurs dans la lutte contre la malnutrition chronique (Christophe., Denis, 2011).

. Si pour ça , elle est présentée comme un élément original et intéressant pour répondre aux besoins de la malnutrition dans les pays en voie de développement (PED). (Bensalem, 2008) , Toutefois, malgré l'accumulation de preuves, son utilisation dans de nombreux centres nutritionnels et les progrès technologiques importants dans sa production dans les pays en développement, la spiruline n'est pas soutenue par les agences intergouvernementales (Christophe., Denis, 2011).



Figure 11 : Photo d'un enfant dénutri ayant été traité avec 10g/j de spiruline pendant 3 mois (Jourdan, 1999).

III.2.5. Principales utilisations :

C'est en 1940 que DANGEARD mentionne pour la première fois l'utilisation des spirulines dans l'alimentation humaine . Il apportait ainsi l'expérience de CREACH, pharmacien des troupes coloniales françaises, qui en 1939, s'était intéressé aux galettes séchées vendues sur les marchés de Massakong à 50 kilomètres du lac Tchad. Ce n'est que plus tard à la suite des résultats de non toxicité des analyses bactériologiques que des tentatives de consommation humaine ont été réalisées dans un hôpital parisien. Par ailleurs des essais avec des bébés dénutris à l'hôpital de Mexico ont donnés de bons résultats .

Au Zaïre, BUCAILLE réalise une expérimentation thérapeutique de réhabilitation nutritionnelle avec de la spiruline chez des enfants atteints de malnutrition protéinoénergétique avec un régime comportant en moyenne 10gr de spiruline pendant deux à trois semaines ; il obtient de très bons résultats.

Un autre essai clinique avec des résultats satisfaisants a été mené au Centre Nutritionnel de Bangui en République Centrafricaine par PICARD au cours duquel les enfants ont reçu 10 gr de spiruline mélangée de sardines, de légumes, de feuilles de manioc et de fruits écrasés.

A Dakar, l'expérimentation de la spiruline dans deux centres de récupération nutritionnelle sur une période de 30 jours a permis d'obtenir un taux de 88,14 % de succès avec un gain pondéral moyen de 50 grammes par jour .Ces travaux démontrent l'intérêt de la spiruline dans le traitement de la malnutrition.

En plus de cet usage alimentaire, la tradition thérapeutique africaine a recours à la consommation de spiruline pour lutter contre certains troubles intestinaux ; pour faciliter l'accouchement ; comme cataplasme contre les oreillons et l'enflure de jambe.

La spiruline est également utilisée comme cicatrisant et comme hypotenseur parce qu'elle contient de l'acide Gamma-linoléique qui par ailleurs présente un intérêt dans la prise en charge de l'hypercholestérolémie.

En effet, NAKAYA a réalisé une étude sur 30 hommes volontaires présentant une hypercholestérolémie sévère associée à une HTA de degré modéré. Ils ont reçu 4,5 gr de spiruline par jour pendant 8 semaines sans modifier leur régime alimentaire habituel. Le taux de cholestérol diminua de 4,5 %, le taux de LDL baissa de 6,1 %, sans perte pondérale. Enfin des recherches au Japon ont montré qu'une consommation régulière de spiruline chez le rat induisait une prolifération de lactobacilles au niveau du caecum trois fois plus abondante que chez le groupe témoin, d'où un moindre risque de survenue de diarrhée (Jourdan, 1999).

CHAPITRE IV

***Techniques d'extraction et de dosage
de différentes fractions biochimiques
de la spiruline***

VI.1.Méthodes de dosage**VI.1.1.Dosage des protéines de la spiruline**

En utilisant la méthode de dosage Bradford suivant laquelle un complexe coloré est obtenu (réactif Bradford – protéine), les résultats indiquent que la spiruline étudiée est composée de 8 à 20 mg de protéines par gramme de matière sèche. Seulement cette quantité mesurée est inférieure à celle attendue théoriquement, puisque la spiruline est constituée d'environ 65% de protéines (650 mg). Ceci est principalement dû à deux raisons essentielles; à savoir:

- Le choix de la protéine référence utilisée qui est celle du jaune d'œuf différente sur le plan structural de celle de la spiruline pour laquelle on préconise préférentiellement la protéine standard SBA (sérum d'albumine bovine),
- Les concentrations choisies pour réaliser la courbe d'étalonnage ne concordent pas avec les quantités attendues.

Quoiqu'il en soit, la technique utilisée reste valable pour doser approximativement les protéines présentes sans être précise sur le plan quantitatif. De ce fait, il apparaît qu'il serait plus judicieux de choisir des protéines plus spécifiques. Cas de la spiruline : Les protéines ont été quantifiées par spectrométrie utilisant la méthode de Bradford. Un volume de 50 mL de suspension algale est centrifugé à 3000 tr/min pendant 2 à 3 min. Les cellules (culot) sont lavées à l'eau distillée et centrifugées de nouveau.

Une fois les chlorophylles écartées après extraction avec de l'acétone à 90% v/v. Le culot obtenu après centrifugation Etude de l'impact de l'incorporation de la spiruline sur les propriétés nutritionnelles, technologiques et organoleptiques est mélangé avec 8 mL d'acétone, cette suspension est agitée vigoureusement puis placée à l'obscurité à 4°C pendant 48 h. Une centrifugation à 800 trs/min est réalisée; le surnageant obtenu renferme les chlorophylles, par contre le culot issu de cette centrifugation est additionné à 1 mL d'eau distillée et à 1,5 mL de réactif de Bradford. La densité optique à 595 nm est lue après un temps de réaction de 10 min aux fins de détermination du taux de protéines.

La courbe étalon est réalisée en préparant des concentrations connues de jaune d'œuf (DOUMANDJI *et al*, 2011).

VI.1.2.Dosage des lipides

La détermination des matières grasses est faite dans cette manipulation selon la méthode d'extraction par le SOXHLET en utilisant l'hexane comme solvant.

50 g d'échantillon sont placées dans le Soxhlet et y introduire 500 mL d'hexane dans le ballon, régler la température à 60 °C.

Par la suite, chasser la majeure partie du solvant à l'aide de l'évaporateur rotatif pour éviter l'ébullition de l'huile qui à la longue pourrait modifier les indices d'acidité.

Le ballon contenant les lipides est placé à l'étuve pendant 30 min à 103°C, puis au dessiccateur pendant 30 min. Le poids des lipides est obtenu par la différence entre le poids final et le poids initial du ballon.

Les résultats sont donnés par la formule suivante:

$$\text{Teneur en MG (\% MS)} = (A-B) \cdot 100 / C \cdot MS / 100$$

A: poids du ballon + extrait en gramme

B: poids du ballon vide en gramme

C: poids de la prise d'essai en gramme

MS: matière sèche en pourcentage (DOUMANDJI *et al* ,2011).

VI.1.3.Dosage des glucides

Cas de la spiruline (la méthode de Miron 2003) : La méthode utilisée pour déterminer le taux des carbohydrates est inspirée de celle de la réaction acide sulfurique + anthrone adaptée à la biomasse algale.

A 100 mg de biomasse sont ajoutés 8 ml d'acide perchlorique agité fortement et laissé Cinq mL du réactif à l'anthrone fraîchement préparé sont ajoutés à 1 mL du filtrat précédemment obtenu puis chauffés à 100°C pendant 12 minutes, une couleur verte se développe en raison de la formation d'un complexe glucose – anthrone, dont on détermine la densité optique à 630 nm après refroidissement du mélange.

Le blanc étant 5 mL du réactif additionné à 1 ml d'eau distillée. Une courbe étalon est réalisée en préparant des concentrations connues de D + glucose dissous dans de l'eau distillée. Densité optique et concentration en glucose (Cg; mg/mL) sont liés par la relation suivante:

$$Cg = 0,536 \times DO_{630} + 0,0028$$

Cg : concentration de glucose (mg/mL) (DOUMANDJI *et al* ,2011).

VI.1.4. Dosage de vitamine B12

la vitamine est la plus difficile à obtenir dans un régime sans viande car aucun végétal courant n'en contient.

La spiruline en serait quatre fois plus riche que le foie cru, longtemps donné comme meilleure source. Certains tests radiochimiques de liaison au facteur intrinsèque nieraient la présence de vitamine B12 "active" dans la spiruline (Leitzmann, 1993). Ces résultats seraient variables selon les souches de spiruline et cette même méthode d'analyse révélerait de hautes teneurs en B12 "active" dans certaines souches (Hau, 1995). Il semble maintenant que la méthode de choix pour le dosage de la vitamine B12 soit basée sur la chimiluminescence. En utilisant cette méthode, une souche particulière de spiruline (NIES-39) a été soigneusement étudiée en terme de contenu et d'identité des composés de la famille de la vitamine B12, les corrinoïdes (Watanabe, 1999, 2002). Il en résulte que le corrinoïde prédominant (83%) est une pseudo-B12, la 7-adeninyl cyanocobamide, mais que la véritable vitamine B12 représente tout de même 17% des corrinoïdes totaux. Le composé prédominant ne semble pas avoir d'activité B12 chez l'homme, mais il n'interfère pas dans le métabolisme normal de la vitamine B12 (Watanabe, 1999). Une note technique de la firme « Cyanotech » mentionne une teneur totale en corrinoïdes de 7 micro-gramme par gramme de spiruline et une fraction de 36% représentant la vitamine B12 assimilable par l'homme (Todd-Lorentz, 1999). Ces valeurs indiquent qu'un gramme de cette spiruline couvrirait plus de 80% des apports quotidiens en B12 pour un adulte.

VI.1.5. Dosage des chlorophylles et des caroténoïdes de la spiruline (la méthode de Hansmann, 1973)

La détermination de la teneur de ces pigments va permettre d'expliquer le changement de la couleur du produit fini. La quantité des chlorophylles est mesurée par spectrophotométrie, 5 mg de poids sec de micro-algue sont centrifugés (800 tours pendant 2 min) puis mélangés à 8 mL d'acétone 90% (v/v) pour extraire tous les pigments.

La suspension est agitée vigoureusement puis mise à l'obscurité à 4°C. pendant 48 h. Un surnageant est obtenu après centrifugation (800 tr/min pendant 5 min). La densité optique de ce dernier est lue au spectrophotomètre (UV - Visible) à 665, 645 et 630 nm. La quantité des chlorophylles est calculée selon les équations suivantes:

$$[cha] = 11,6 \text{ DO } 665 - 1,31 \text{ DO } 645 - 0,14 \text{ DO } 630$$

$$[chb] = 20,7 \text{ DO } 645 - 4,34 \text{ DO } 665 - 4,42 \text{ DO } 630$$

$$[chc] = 55,0 \text{ DO } 630 - 4,64 \text{ DO } 665 - 16,3 \text{ DO } 645$$

Cha Chb et Chc sont les concentrations des chlorophylles a, b et c en mg/L.

Les caroténoïdes sont extraits en ajoutant des parts de 1 mL d'éthyle éther jusqu'à obtention d'un extrait clair. Le solvant est ensuite évaporé. Le culot obtenu est alors mis en suspension dans 5 mL d'acétone 90% (v/v) puis lu par spectrophotométrie à 444 nm. La concentration en caroténoïdes (Ct en mg/L) est donnée par l'équation suivante:

$$Ct = 4,23 \times DO_{444} - 0,0439 \text{ (DOUMANDJI et al, 2011).}$$

VI.2.Méthodes d'extraction

l'extraction est une méthode de production de la matière pure d'un composant, donc pour obtenir l'extrait de phycocyanine on fait la méthode suivante.

VI.2.1.La phycocyanine

C'est un des rares colorants alimentaires naturels de couleur bleue. Son usage est autorisé en Europe. Un extrait liquide de spiruline fraîche titrée en phycocyanine a été mis au point par la société Alpha Biotech (Jaouen et al 1999)

La phycocyanine extraite de la Spiruline est vendue sous le nom de « linablue » ou « sérum bleu » dans les industries alimentaires et cosmétiques à titre de colorant alimentaire, marqueur fluorescent, enzyme (Loïc et al, 2004).

VI.2.1.1.Méthodes d'extraction de la phycocyanine

a- Lyse cellulaire

La première étape consiste à dénaturer les cellules de spiruline afin de faciliter l'extraction des molécules incluses dans les thylacoïdes.

Une technique consiste en l'alternance de phases de congélation-décongélation suivi d'un traitement par sonication. Ces étapes vont fragiliser et rompre les membranes cellulaires et ainsi faciliter l'accès aux molécules présentes dans le cytoplasme et les organites intracellulaires.

Certains préfèrent ajouter une solution de tampon phosphate pH 6,8 durant l'étape de congélation-décongélation et au lieu d'utiliser la sonication, ils utilisent un *mixer* pour rompre les membranes cellulaires et ajoutent une étape d'extraction à l'acide chlorhydrique (concentration optimale 10N) avant d'effectuer la centrifugation.

La séparation et la concentration des différents constituants s'effectuent ensuite par une étape de centrifugation permettant de recueillir un surnageant de couleur bleu clair (Sébastien, 2008).

b- Séparation et purification

Plusieurs méthodes de séparation de phases existent. L'une d'entre elles consiste en différentes phases de fractionnement par précipitation avec une solution de sulfate d'ammonium à 30%, 50% et 60% (m/v). Les précipitats des solutions à 50% et 60% permettront d'isoler respectivement la C-phycocyanine et l'allophycocyanine qui seront par la suite solubilisées dans une solution de tampon phosphate (0,05 M pH 7) .

La séparation peut aussi s'effectuer par filtration sur colonne (exemple : colonne Bio-Gel avec des limites d'exclusion situées entre 1500 et 20000 Da) permettant de recueillir différentes fractions et d'isoler celle contenant les molécules de phycocyanine .

Ces fractions isolées subiront ensuite différentes étapes de purification par chromatographie sur colonnes (colonne DEAE-Sephadex puis Sephadex G-100) (colonne d'hydroxyapatite puis DEAE Sephadex A-50) (Sébastien, 2008).

Le degré de pureté de la phycocyanine obtenu est généralement évalué en utilisant le ratio d'absorbance A_{620/280} pour la phycocyanine et A_{655/280} pour l'allophycocyanine où l'absorbance à 620 nm et 655 nm correspond respectivement à l'absorbance maximale pour la phycocyanine et l'allophycocyanine et l'absorbance à 280 nm à celle des protéines totales. Ainsi au ratio de 0,7, la pureté est considérée de catégorie alimentaire, à 3,0 de catégorie réactif et supérieure à 4,0 de catégorie analytique (Sébastien, 2008).

VI.2.2.Le calcium

puisque le calcium est un composant essentielle de la spiruline et leur interet corporel majeur on le fait une extraction

VI .2.2.1. Méthodes d'extraction du calcium de la spiruline

L'extraction s'effectue à partir de la poudre séchée de spiruline avec de l'eau bouillante. L'extrait aqueux recueilli est ensuite traité à l'acide trichloroacétique 10 %. La fraction soluble est ensuite purifiée par distillation suivie ensuite par une lyophilisation. La purification s'effectue par filtration sur gel sephadex et seule une fraction sur les trois obtenues permet de recueillir le polysaccharide calcium-spirulan.

Les différentes méthodes d'extraction exposées ont été à la base des essais visant à étudier l'action spécifique des molécules de phycocyanine et de calcium-spirulan (Sébastien, 2008).

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

Les spirulines(*Arthrospira platensis*), sont des cyanobactéries qui ont une composition chimique riche en différentes constituantes, parmi ces derniers le composant majeur est les protéines, les lipides ,les glucides, ainsi que les vitamines et les minéraux.....etc.

Cette composition donne à la spiruline(*Arthrospira platensis*), un statut très important qui sera impliqué dans le monde car sa richesse alimentaire, donc cette dernière fais partie d'un indicateur de développement mondiale dans des plusieurs domaines, dans ce but les pays d'Afrique font une vaste culture impliquée surtout au Tchad, Cote d'Ivoire, Borkina Faso...etc. pour la lutte contre la malnutrition et aussi pour l'amélioration des produits énergétiques.

De même la spiruline(*Arthrospira platensis*), est un complément alimentaire ; plusieurs chercheurs font des expériences sur son effet thérapeutique et sanitaire ils ont trouvé que son intérêt touche plusieurs domaines de vie.

Ce travail se base sur l'étude des fractions biochimiques et montre la valeur et l'intérêt fonctionnel des constituantes essentielles de la spiruline(*Arthrospira platensis*) qui est actuellement l'aliment de santé, car son utilisation pharmaceutique aux différents produits surtout les produits énergétiques qui assurent le mouvement physique surtout pour les sportifs, et aussi pour faire une dégradation de la famine aux pays pauvres.

Ce travail a visé à la sensibilisation de la société à l'intérêt de la culture et l'utilisation de la spiruline et son intégration dans notre régime alimentaire, Ce travail constitue aussi une initiation à l'introduction de la spiruline dans cette région saharienne et d'autres études pratiques seront nécessaires à la maîtrise de sa culture.

RÉFÉRENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- 01-Andres I. (1981). Les Algues. 61p.
- 02-Anonyme. (2007). Complément d'information sur la spiruline. Saint Augustin. Fabrication artisanal France. Ed . 1-15.
- 03-Anonyme. (2009). Algues. FEPS: 1-2.
- 04- Anonyme. (2009). La nutrition. Hes. So. Heds, Genève. 7p.
- 05-Anonyme. (2011). Les algue. Eau et rivières. Ed. 1-9.
- 06-Bellay A. (1993). Connaissances sur les bénéfices de la spiruline sur la santé. Journal of applied phycology. Ed. 1-235.
- 07-Bensalem M. (2009). La spiruline peut-être un atout pour la santé et le développement en Afrique. Revue critique réalisée par cinq experts à partir de documents d'étape. Ed.1-22.
- 08-Bernard O., Cadoret J. (2008). La production de biocarburant lipidique avec des microalgue : promesses et défis, journal de la société de biologie.1-16.
- 09-BOURRELLY P. (1985). Encyclopédie universalise. Corpus 5, Cloîtres. Design, éditeurs à Paris.
- 10-Charlemagne D. (2008). La spiruline : aliment santé ?. Thèse de doctorat : Pharmacie, France université de marseille, 98p.
- 11-Christophe Girardin A. (2007). La spiruline. Faculté de médecine paris. Ed. 1-16.
- 12-Dankoko B. (1999). La spiruline : une source alimentaire a promouvoir. Médecine d'Afrique noire. Ed. 1-46.
- 13-DE RIVIERS Bruno. (2003). Biologie et phylogénie des algues. Tome 2, 2eme edition, Belin.
- 14-Denis V. (2011). La spiruline et les sportifs. ANTENNA TECHNOLOGIE. Ed. 1-22.
- 15-Déogratias K. (2003). La malnutrition et ses conséquences dans le monde. Rapport du séminaire fait à kazongo. Ed . 1-28.
- 17-Doumandji A., et al. (2012). Etude de l'impact de l'incorporation de la spiruline sur les propriétés nutritionnelles technologie et organoleptique du couscous artisanale. Nature et technologie. Ed.1-50.
- 18-Elyah A. (2001-2003). Quel avenir pour la spiruline ?. Ed. BOURKINA FASO. 27p.
- 19-Falquet J., Hurni J. (2006). Spiruline aspects nutritionnels. Ed. ANTENNA TECHNOLOGIES, BOURKINA FASO. 41p.
- 20-Falquet J. (2006). Le séquençage complet de la spiruline. Ed. ANTENNA TECHNOLOGIE, SUISSE. 99p.

- 21-Falquet J. (2006). Un module d'apprentissage pour la production de spiruline. ANTENNA TECHNOLOGIE. Ed. 1-15.
- 22-FALQUET J. (1996). Spiruline : Aspects nutritionnels, document Antenna Technologie, Genève.
- 23-Falquet J. (2006). Malnutrition. ANTENNA TECHNOLOGIE. Ed. 1-11.
- 24-Falquet J. (2006). La spiruline. ANTENNA TECHNOLOGIE. Ed. 1-4.
- 25-Fanida B. (2012). Petites nouvelles de la spiruline. Spiruline de Giens. EFOIR. 1-10.
- 26-FELDMANN J. (1985). Encyclopédie universalise. Corpus I, Aalto anabaptisme, Editeurs a Paris.
- 27-Geneclie M. (2011). Etude de l'environnement économique du secteur de la spiruline en coté d'ivoire. Rapport de mission projet rogead. Ed.1-28.
- 28-GRASSE P.P., et FELDMANN J. (1963). Botanique. Anatomie cycles évolutifs systématiques. Masson, Paris.
- 29-Gustavson K., et al. (2000). Bénéfices pour la santé. Sophi nature. Ed. 1-6.
- 30-Hug C., et al. (2011). Bilan et perspectives. ANTENNA TECHNOLOGIE. Ed. 1-30.
- 31-Jean-Paul J. (1999). Cultivez votre spiruline. Ed. ANTENNA TECHNOLOGIE, SUISSE. 125p.
- 32-Josephen K. (2007). Bonne et heureuse année à tous les amis de la spiruline artisanale et solidaire. Spiruline artisanale. Ed.1-10.
- 33-Loïc C., et al. (2003). Utilisations de la spiruline autrement que pour traiter la malnutrition. Ed tulear, Marseille. 86p.
- 34-Loic C. (2004). Cyanobacteria for health IOPR. Ed. Madagascar. 58p.
- 35-Loic C., Nardo V. (2004). Colloque international sur les cyanobactéries pour la santé. La science et le développement. Thèse de doctorat : Biochimie. France : Institut océanographique Paul Ricard. 203p.
- 36-Madurai I. (2002). La spiruline contre la malnutrition accompagnement du film. Ed, Inde. 89p.
- 37-Mahamat S. (2003). Utilisation et consommation de la spiruline. Ed. INTERNATIONAL WORKSHOP, Tchad. 336p.
- 38-Marfaing H. (2007). Les algues ont-elles une place en nutrition ?. CEVA. 1-7.
- 39-Murielle T. (2010). Le joyau bleu de la spiruline. Nutrithérapie. Vol.116 : 1-84.
- 40-Nikiéna J., et al. (2009). Stratégie d'utilisation des substances naturelles dans la prise en charge des personnes vivant avec le VIH : Dossier spéciale de médecine traditionnelle en Afrique. ETHNOPHARMA. Ed. 1-5.

- 41-NULTSCH W. Mars (1998). Botanique générale (traduction de la 10e édition allemande par Roger Miesch et Yves Sell), de Boeck université : Thieme Verlag, Paris. ROGER CAETINI, (1976). Boards Encyclopédie, Bordas .Paris
- 42-Saidi N., et al. (2011). Propriétés pharmacologiques et biologique d'un mélange de poudres de dattes (MECH-DEGLA) et de spiruline. Thèse de doctorat : Technologie alimentaire. Boumerdès (ALGERIE).Algérie, 80p.
- 43-Sguera S. (2008). Spiruline platensis et ses constituants intérêts nutritionnels et activités thérapeutiques. Diplôme d'état de docteur en pharmacie : Pharmacie. Université Henri Poincaré (Nancy). 128p.
- 44-Tsaraherrtra J. (2005). Adaptation de la spiruline de sud de Madagascar à la culture en eau de mer mise au point de structures de production à l'échelle villageoise. Thèse de doctorat Es sciences en océanologie appliquée : Océanologie appliquée. Institut de recherche pour le développement. Université de Toliara. 183p.
- .

ANNEXES

ANNEXES

Annexe 1 : Photos d'illustration des expériences réalisées à Toliara.
(TSARAHEVITRA, 2005)

Préparation de milieu de culture en laboratoire de Spiruline à l'Institut Halieutique et des Sciences Marines.



1- Traitement de l'eau de mer (décantation, siphonage)



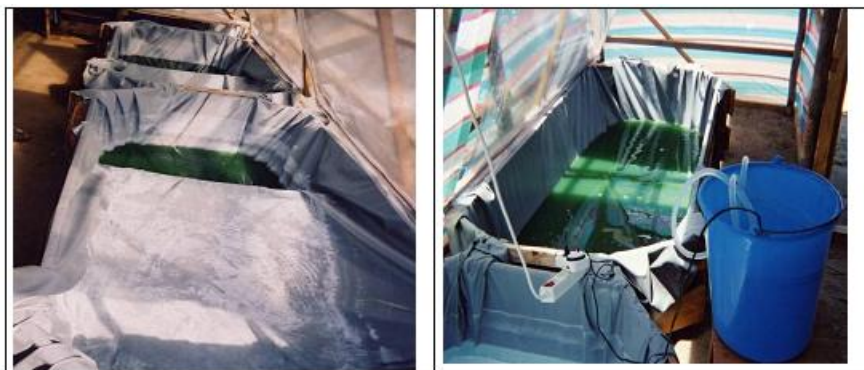
2-Multiplication de la souche en laboratoire dans des bouteilles, des erlènes de 5 l et des cuves de 40 l



3-Bassin de culture (première construction et après réhabilitation)



4-de l'eau de mer dans le bassin de 2 m² et de 10 m²



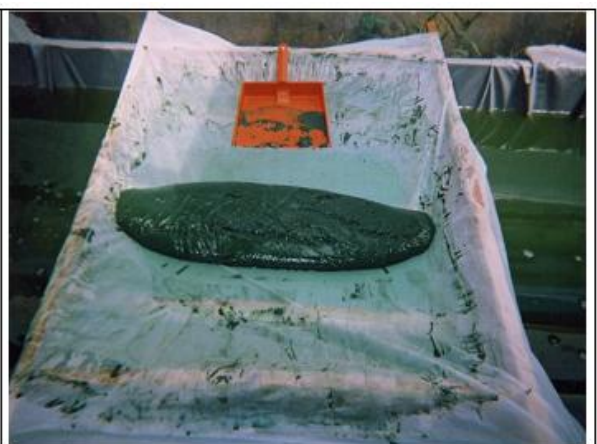
5-Multiplication de la souche en bassin de 2 m²



6-Culture en bassin de 10 m²



7-Récolte : Filtration



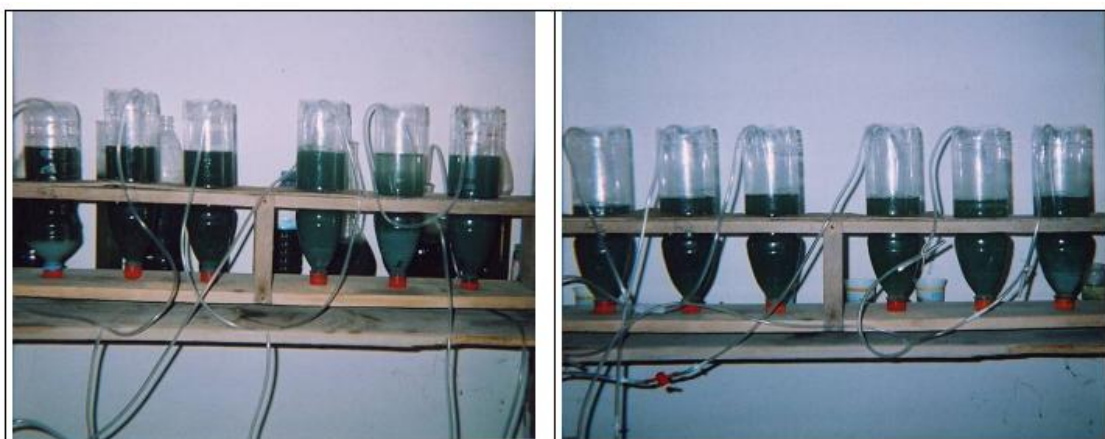
8- Pâte épaisse de Spiruline sur la toile de filtration



9-Pressage



10-Extrusion, séchage à l'étuve et Spiruline sèche sur des claies de séchage



11-Expérience sur la souche « Paracas » à gauche et « Malgache » à droite

Annexe 2 : Principaux produits contenant de la spiruline sur le marché (1/2)
(SGUERA, 2008)

Laboratoire Nom du produit	Indications	Posologie Quantité de spiruline par unité	Photo
ARKOPHARMA Arkogélule Spiruline	- fatigue, convalescence - complément diététique du sportif - apport protéiné en période d'amincissement	2 gélules matin, midi et soir, à prendre avec un grand verre d'eau au moment des repas 390 mg par gélule de poudre totale cryobroyée, titrée à 55 % de protéines	
3 CHENES Chrono energy 1000	- Fatigue - Baisses de forme régulières	1 comprimé le matin au cours du petit- déjeuner et 1 comprimé le soir au cours du dîner. 100 mg par comprimé	
BIORGA Ecophane 60 cpr	- Nourrir, fortifier et aider la croissance des ongles et des cheveux	2 comprimés par jour pendant 3 mois 7,5 mg par comprimé	
MARCUS ROHRER Marcus Rohrer Spirulina 540 cpr	- Effet tonique général - Revitalisant	2 comprimés 3 fois par jour pendant 1 mois 300 mg par comprimé	

Annexe 3 : Principaux produits contenant de la spiruline sur le marché (2/2)

Laboratoire Nom du produit	Indications	Posologie Quantité de spiruline par unité	Photo
ESTHEDERM Intensif Spiruline	- Crème revitalisante haute concentration spécifique pour les peaux fatiguées et dévitalisées	Appliquer la crème sur la peau propre et sèche du visage, cou et décolleté après le Sérum Intensif Spiruline.	
ESTHEDERM Intensif Spiruline Sérum	- Sérum revitalisant haute concentration spécifique pour les peaux fatiguées et dévitalisées	Appliquer le Sérum Intensif à la Spiruline sur la peau propre et sèche avant la Crème Intensive à la Spiruline et faire Pénétrer	
FORTE PHARMA 100% Abdos Men	- Activer la construction des muscles - Réduire la masse grasse	1 comprimé et 1 capsule matin et soir 50 mg par comprimé	
ALPHA BIOTECH Spirulysat	- Recommandée pour un rétablissement plus rapide après des maladies inflammatoires, de grosses fatigues ou des carences importantes	1 ampoule par jour pendant 20 jours 110 mg d'extrait dont 8 mg de phycocyanine	

Annexe 4 : Aliment pour bébés. (FANIDA, 2012)



Contient de la spiruline ! (les biberons sont verts)

Prémi®amande est une céréale instantanée à complément protéinique destiné à être utilisé pendant la période de sevrage des nourrissons et comme complément à l'alimentation des enfants en bas âge et/ou en vue de leur adaptation progressive à une alimentation normale

A partir du 4ème mois.

Résumé

Ce travail a pour but de connaître l'intérêt biochimique de la spiruline (*Arthrospira platensis*), aussi son utilisation aux différents domaines de vie à cause de sa richesse en plusieurs composantes alimentaires essentielles. Actuellement la spiruline a une large culture au différents pays dans le monde même en Algérie(Tamanrasset, Ouargla).

La spiruline est considérée actuellement comme un aliment complémentaire à base protéique, c'est pour cela; elle est le meilleur outil contre la malnutrition qui touche surtout l'Afrique donc la culture de cette espèce d'algue va faire une évolution au niveau de récolte alimentaire en diminuant les conséquences liées à la malnutrition .

Mots clés: La spiruline, *Arthrospira platensis*, intérêt techno fonctionnel , cyanobactérie, malnutrition.

Abstract

The objective of this work is to identify the biochemical significance of Spirulina (*Arthrospira platensis*) , so their use in various areas of life because of its high number of essential dietary components that work aims. Currently spirulina has a wide culture different paid in the world even in Algeria (Tamanrasset, Ouargla).

Spirulina is currently considered a complementary food based on protein, if it's for, it is the best tool against malnutrition that affects mostly African culture so that algal species will be an evolution in food crop reducing the consequences of malnutrition.

Keywords: Spirulina, *Arthrospira platensis*, interest tecno functional cyanobacterium, malnutrition.

ملخص

الهدف من هذا العمل هو التعرف على الأهمية البيوكيميائية للسبيرولينا (*Arthrospira platensis*) بما في ذلك استعمالاتها الواسعة في مختلف مجالات الحياة و هذا لغنى هذه الأخيرة بعدة مركبات غذائية ضرورية . إذا حاليا عدة دول تقيم زراعة واسعة لهذا الطحالب بما في ذلك الجزائر (تمنراست ورقلة) .

تعد السبيرولينا حاليا بمثابة غذاء كامل يتكون أساسا من البروتين لهذا تعد الوسيلة الأنجع لمكافحة ظاهرة سوء التغذية التي تمس بالأخص دول القارة الإفريقية فزراعة هذا النوع المهم من الطحالب من شأنه إحداث تطور كبير في الإنتاجية الغذائية التي تساهم بدورها في التقليل أو القضاء على المجاعة

الكلمات المفتاحية : السبيرولينا, الأهمية الوظيفية , الطحالب الزرقاء المخضرة , سوء التغذية.

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE D'EL-OUED
FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE
DEPARTEMENT DE BIOLOGIE CELLULAIRE ET MOLECULAIRE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de Licence Académique

Filière : Biochimie

Spécialité : Biochimie.

THEME

**Intérêt techno fonctionnel de différentes
fractions biochimiques de la spiruline.**

Présenté par :
GASMI Nadia
KHELLOU Somia
LAOUTI Aicha

Promoteur :
M. LAICHE Ammar Touhami

Année universitaire 2012/2013.

Remerciement

Nous tenons à remercier avant tout Dieu tout puissant qui nous a donné la volonté, la force, la santé et la patience pour élaborer notre travail.

*Nous remercions en particulier notre encadreur **MONSIEUR LAICHE AMMAR TOUHAMI** qui nous a aidé et conseillé durant cette année.*

*Nous remercions également **M^{me} CHENNA ADALA** pour sa contribution afin que nous réussissions .*

Ainsi nous tenons à exprimer nos remerciements à tous les enseignants de département de biologie cellulaire et moléculaire .

Nos remerciements vont aussi à tous les membres de jury qui ont accepté de jury notre travail.

*Nous adressons aussi nos vifs remerciements à notre doyen monsieur **BEN HAWA BOUBAKER** .*

En fin, nous tenons à remercier nos familles et nos amis, qui ont toujours été près de nous dans les moments difficiles.

SOMMAIRE

Introduction générale	
Chapitre I : Généralités sur les algues	
I.1. Généralités sur les algues.....	11
I.2. Généralités sur les cyanobactéries.....	12
I.2.1. Cytologie	12
I.2.1.1. Aspects cellulaires.....	12
I.2.1.2. Paroi cellulaire.....	13
I.2.1.3. Pigments.....	14
I.2.2. Mode nutritionnelle.....	14
I.2.3. Reproduction.....	15
I.2.4. Mobilité.....	15
I.2.5. Ecologie.....	15
I.2.6. Classification.....	16
I.3. La spiruline.....	18
I.3.1. Historique de la spiruline.....	19
I.3.2. Classification	20
I.3.3. Morphologie.....	20
I.3.4. Bio-Ecologie	21
I.3.5. Les gisements naturels dans le monde.....	22
Chapitre II : La composition chimique et biochimique et la valeur nutritionnelle de la spiruline	
II.1. Composition	25
II.2. La valeur nutritionnelle de la spiruline	29
II.2.1. Les Protéines	29
II.2.1.1. Quantités, composition.....	29
II.2.1.2. Qualité.....	30
II.2.1.3. Utilisation protéique nette	30
II.2.2. Les lipides	30
II.2.2.1. Les lipides totaux	30
II.2.3. Les glucides	31
II.2.4. Les acides nucléiques	31
II.2.5. Les vitamines.....	32

II.2.5.1. Vitamines hydrosolubles.....	32
II.2.5.2. Vitamines liposolubles	33
II.2.6. Les minéraux et oligo-éléments.....	33
II.2.6.1. Calcium.....	34
II.2.6 .2. Magnésium.....	35
II.2.6 .3. Phosphore	35
II.2.6. 4. Fer.....	35
II.2.6 .5. Zinc.....	36
II.2.6.6. Sélénium.....	36
II.2.6.7. Les pigments	37
II.2.6. 8. Métaux.....	37
Chapitre III : Conditions de culture de la spiruline et domaines d'utilisation	
III.1. La culture de la spiruline.....	38
III.1 .1.Bases techniques de la production	38
III.1.2. Facteurs essentiels de la culture	39
III.1.2.1. Facteurs climatiques.....	39
III.1.2.1.1. Température	39
III.1.2.1.2. Pluviométrie	39
III.1.2.2. Autres facteurs	40
III.1.2.2.1. Lumière.....	40
III.1.2.2.2. Salinité	40
III.1. 2.2.3. pH	41
III.1.3. Bassins de culture	41
III.1.4 . Milieu de culture	43
III.1.5. Ensemencement	43
III.1.5.1. choix de la souche.....	43
III.1.5.2. Mesure de la concentration d'une culture de spiruline	44
III.2. Domaines d'utilisation.....	46
III.2.1 . Utilisations sanitaires de la spiruline	47
III.2.1.1. Cholestérolémie.....	47
III.2.1.2. Cancer	47
III.2.1.3. Anémie	48
III.2.1.4. Néphrites	48

III.2.1.5. La spiruline contre le VIH	49
III.2.1.6. Effets contre l'hyperlipidémie	49
III.2.1.7. Effets protecteurs contre les radiations	50
III.2.1.8. Effets contre la toxicité des reins.....	50
III.2.1.9. Effets sur la flore intestinale	50
III.2.1.10. Effets contre le diabète, l'obésité et l'hypertension.....	51
III.2.1.11. Spiruline et femmes	51
III.2.1.12. Spiruline et régime	52
III.2.1.13. Spiruline et végétarisme	52
III.2.1.14. La spiruline et les sportifs (L'augmentation de la VO2 max).....	52
III.2.2. Spirulina platensis et l'industrie pharmaceutique.....	53
III.2.3. Spirulina platensis et l'industrie cosmétique.....	53
III.2.4. Spirulina platensis et l'industrie alimentaire	54
III.2.4.1. Alimentation animale.....	55
III.2.4.2. Alimentation humaine.....	55
III.2.4.3. Cuisiner la spiruline.....	55
III.2.4.4. La lutte contre la Malnutrition.....	56
III.2.5. Principales utilisations	58
Chapitre IV : Technique d'extraction et dosage des différentes fractions biochimiques de la spiruline	
VI.1. Méthodes de dosage.....	59
VI.1.1. Dosage des protéines de la spiruline.....	59
VI.1.2. Dosage des lipides.....	60
VI.1.3. Dosage des glucides.....	60
VI.1.4. Dosage de vitamine B12.....	61
VI.1.5. Dosage des chlorophylles et des caroténoïdes de la spiruline (la méthode de Hansmann, 1973)	61
VI.2. Méthodes d'extraction.. ..	62
VI.2.1. La phycocyanine.....	62
VI.2.2. Le calcium.....	63
Conclusion générale.....	64
Références bibliographiques.....	65
Annexes.....	68
Résumé et Mots clés.....	75

LISTE DE FIGURES

Numéro	Titre	Page
Figure 1	Différentes formes cellulaires des cyanobactéries.	13
Figure 2	Vue au microscope optique (G 100x10) des filaments de spiruline.	18
Figure 3	Morphologies typiques de Spiruline Source : Antenna Technologie modifiée	21
Figure 4	Cycle biologique de la Spiruline selon Balloni et al.	22
Figure 5	composition nutritionnelle pour 10g de spiruline.	29
Figure 6	un bassin en tissu polyamide enduit PVC, Ecopark, Madurai, Tamil Nadu (Inde), 18 m ² , 1998.	42
Figure 7	Dans un village près de Madurai, Tamil Nadu (Inde), 1 m ² , 1996 .	42
Figure 8	Diagramme récapitulatif des paramètres de culture et de traitement de spiruline	44
Figure 9	Récolte de Spiruline en salle après pré-concentration (A) et récolte directe sur le bassin de culture (B)	45
Figure 10	Extrusion de biomasse pressée, avec pistolet à silicone Sika (professionnel, typemanuel "à poche"), sur un plateau de séchoir électrique Stoeckli, Mialet, 1998 .	46
Figure 11	Photo d'un enfant dénutri ayant été traité avec 10g/j de spiruline pendant 3 mois.	57

LISTE DES TABLEAUX

Numéro	Titre	Page
Tableau I	comparaison entre les phylums .	11
Tableau II	Principaux ordres des cyanobactéries et leurs principaux genres.	16
Tableau III	Systématique de la spiruline.	20
Tableau IV	Sites de gisements naturels de Spiruline dans le monde selon FOX.	23
Tableau V	les principaux constituants chimiques et biochimiques de la spiriline.	26
Tableau VI	rapports d'efficacité protéique comparés, intérêt des complémentations	29
Tableau VII	la répartition des acides gras pour deux souches de spiruline.	31
Tableau VIII	teneur en acides nucléiques de quelques aliments.	32
Tableau IX	Vitamines hydrosolubles contenues dans la biomasse de Spirulina platensis en fonction des saisons (mg/100g de matière sèche).	33
Tableau X	Vitamines liposolubles contenues dans la biomasse de Spirulina platensis (mg/100g de matière sèche).	33
Tableau XI	Teneur en oligoéléments dans la spiruline.	34
Tableau XII	Analyse d'un milieu de culture typique.	43
Tableau XIII	tests cliniques qui présentent l'effet de la spiruline sur autre maladies.	51

LISTE DES ABREVIATIONS

FEPS : Fondation de l'Eau Potable Sûr.

HEDS : Haute Ecole De Santé Genève.

IRD : Institut de Recherche pour le Développement.

CSSD: Cyanobacteria for Health for Science and Development.

IOPR : Institut Océanographique Paul Ricard.

PV VIH : Personnes Vivant avec le VIH.

VO₂ : Volume d'Oxygène.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction

Dans le monde, plus de 800 millions de personnes, dont 200 millions d'enfants de moins de 5 ans souffrent de sous-alimentation. Par ailleurs, des milliers d'enfants meurent chaque jour emportés par des maladies infectieuses sévèrement aggravées par la malnutrition. Les régions où l'explosion démographique est la plus forte sont aussi celles où sévit une pénurie chronique de nourriture. C'est pourquoi la FAO, l'OMS et l'UNICEF ont recommandé aux chercheurs du monde entier de réexaminer le potentiel alimentaire de l'humanité. Des ressources ignorées jusqu'alors commencent à émerger grâce à ces recherches, parmi ces ressources figure la spiruline (ANONYME., 1996).

Le spiruline, cyanobactérie traditionnellement consommée depuis des siècles par certaines populations (Farrar, 1966), et de nos jours encore au Tchad (Léonard, 1966; Delpeuch, 1975; Sorto, 2003) font l'objet d'une redécouverte depuis quelques années. Autrefois classées parmi les "algues bleues-vertes", elles ne sont pas à proprement parler des algues, même si par commodité on continue à les désigner comme telles. C'est d'abord l'impressionnante teneur en protéines des spirulines, ainsi que leur vitesse de croissance, dans des milieux totalement minéraux, qui ont attiré l'attention des chercheurs, comme des industriels (FALQUET., HUNRI., 2006).

Différents acteurs de la recherche pour le développement sont alors intervenus pour étudier la Spiruline dans son milieu naturel (au Tchad et au Mexique), pour analyser ses constituants, particulièrement ses propriétés nutritionnelles, pour développer des systèmes de culture adaptés aux pays en voie de développement. Ces acteurs étaient des instituts français (ORSTOM, IFP), des chercheurs de différents pays, des organismes de financement (DGRST, FAO, UNICEF), des ONG. Par la suite, les instituts français et certains bailleurs de fonds se sont désintéressés de la Spiruline (LOIC, 2004).

Au cours de ces 30 dernières années de très nombreuses expériences de production de Spiruline ont eu lieu dans le monde entier, apportant technologie et savoir faire pour la réalisation de systèmes modulaires de production adaptés à un large éventail de pays du Tiers Monde. Plusieurs implantations industrielles sont aujourd'hui opérationnelles principalement en Asie et en Amérique (LOIC, 2004).

A l'instar des pays en voie de développement et particulièrement ceux d'Afrique, l'Algérie déploie des efforts dans le but de garantir une indépendance économique, agricole et notamment alimentaire. Parmi les secteurs ciblés par le plan national du développement (agricole et rurale PNDAR), on note, l'aquaculture.

La tentative d'introduction de la spiruline dans nos habitudes alimentaires, nous oblige, dans un premier temps, de bien maîtriser les conditions de sa culture et une sensibilisation visant à mettre en évidence, ses perspectives éventuelles.

Le présent travail, est divisé en quatre chapitres :

- ü 1-Généralité sur les algues.
- ü 2-La composition chimique et biochimique et la valeur nutritionnelle de la spiruline
- ü 3-Conditions de culture de la spiruline et domaines d'utilisation.
- ü 4-Techniques d'extraction et dosage des différentes fractions biochimiques de la spiruline.

CHAPITRE I

Généralités sur les algues

I.1. Généralités sur les algues

Les algues sont des organismes chlorophylliens se développant dans l'eau ou dans des milieux très humides. Bien que surtout abondantes dans les eaux des mers, des lacs, des mares, des eaux courantes et des eaux thermales, on en trouve également sur les rochers humides et sur la terre et exceptionnellement, elles peuvent être endophytes de tissus animaux ou végétaux (Andres, 1981).

L'air, la lumière et des sels dissous sont, en plus de l'eau, nécessaires à leur développement. Groupées avec les champignons dans la division des Thallophytes, les algues constituent en réalité un vaste ensemble hétérogène d'embranchements très distincts les uns des autres et n'ayant entre eux que peu de caractères communs (Feldmann, 1963). La distinction entre ces différents embranchements d'algues est faite d'après des caractères d'ordre cytologique et biochimique ainsi que des différences de structure et de mode de reproduction. En dehors de nombreuses formes unicellulaires, on trouve des algues pluricellulaires formant des thalles sans feuilles, ni tiges, ni racines, ni vaisseaux conducteurs (Andres, 1981).

Les algues sont divisées en 6 grands phylums d'après la nature des pigments et des réserves cellulaires (Andres, 1981). Parmi ses réserves : amidon chez les algues verts, autres glucides voisins la glycogène chez les algues rouges, et variables mais jamais d'amidon en cas d'algues brunes (Marfaing *et al*, 2007) ; ce sont les Cyanophytes, les Chlorophytes, les Euglénophytes, les Chrysophytes, les Rhodophytes et les Pyrrophytes... (Andres, 1981).

Tableau I : comparaison entre les phylums .

Phylums	Les constituants	Les pigments	Les réserves
Les cyanophytes	Manque de noyau, chromatophores et de flagelle. une teinte bleu-verte	Chlorophylle vert a et c, phycocyanine bleu-vert et phycoérythrine rouge et β carotène	glycogène
Les Chlorophytes	Présence de noyau, deux ou quatre flagelles du même taille, teinte verte	Chlorophylles a et b, β et α carotène et xanthophylles	Amidon intraplastidiale

Les eulénophytes	Présence de flagelle ,teinte rouge qui masque la teinte verte	Chlorophylles a et b , β carotène et des xanthophylles	Grains de paramylonextraplastidiale
Les chrysophytes ou chromophytes	Présence de flagelle, chromatophore brune, jaune ou vert jaunâtre	Chlorophylles a et c , β carotène	Jamais d'amidon
Les Rhodophytes	Manque du flagelle ,une teinte rougeâtre	Chlorophylles a et d , β et α carotène et des xanthophylles	Rhodamylon ou amidon floridée extraplastidiale
Les pyrophytes	Forme biflagellée	Chlorophylles a et c , β carotène ,biliprotéine	Amidon extraplastidiale

ANDRES (1981)

I.2. Généralités sur les cyanobactéries

Les algues constituent un vaste assemblage artificiel d'organismes polygénétiqement éloignés, dont l'étude, pour des raisons historiques, a cependant donné naissance à une discipline : la phycologie.

La classification des algues est partiellement biochimique, mais reste encore fondée sur les caractéristiques plastidiales telle que la nature et la localisation des pigments (chlorophylles, phycobilines, carotènes et caroténoïdes) ou la disposition des thylacoïde (DE REVIERS, 2003).

Les algues bleues sont nommées "Cyanobactéries". Les cyanobactéries forment l'essentiel des bactéries capables de la photosynthèse avec production d'oxygène (BOURREL, 1985).

I.2.1.Cytologie

I.2.1.1.Aspects cellulaires

Ce sont des végétaux unicellulaires ou pluricellulaires, fondamentalement autotrophes, constitués d'éléments identiques isolés ou disposés en file linéaire, dépourvus d'un noyau à membrane définie et de mitochondrie (GRASSE *et al*, 1963) .

Elles peuvent être unicellulaires ou pluricellulaires; dans ce dernier cas, leurs cellules s'arrangent en amas de type colonies ou, le plus souvent, en filaments composés de cellules alignées (ces filaments sont appelés trichomes). La taille des cellules de cyanobactéries se situe généralement entre 1 et 10 microns (Falquet, 1996).

Les cellules présentent une coloration homogène car elles n'ont pas de plastides individualisés. En effet, elles sont faites d'une zone périphérique colorée, chromoplasma, et une partie centrale plus claire, centroplasma ou nucléoplasma. Ce dernier fait fonction du noyau mais reste souvent diffu et sans membrane limitant (BOURRELY, 1985).

Les cyanobactéries, sont ainsi nommées car elles présentent toutes les caractéristiques essentielles des procaryotes : l'ADN (se localise dans des zones données du cytoplasme) n'est pas associé à des histones, sa réplication et sa répartition dans les cellules filles, ne sont pas bien connues, mais on peut supposer qu'elles se font d'une manière semblable à celle des bactéries. Il n'y a pas de mitochondries, ni de dictyosomes, ni de réticulum endoplasmique, ni de plastides (NULTSCH, 1998).

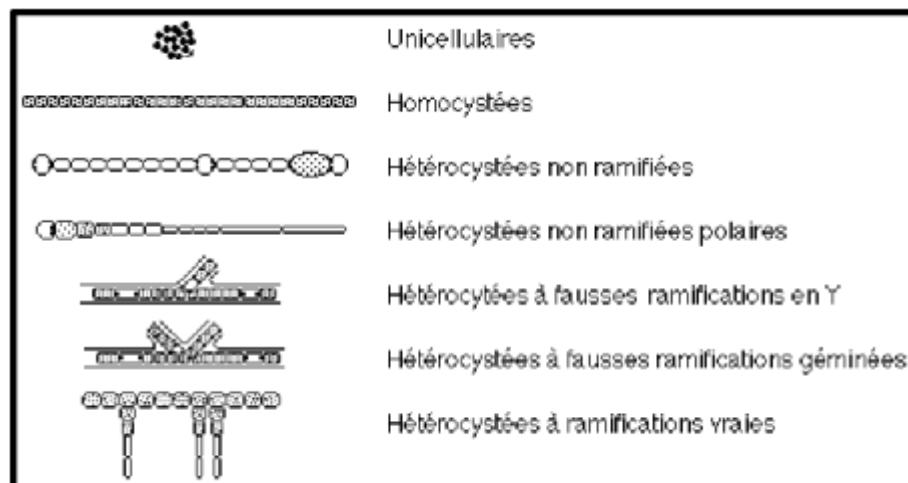


Figure 1 : Différentes formes cellulaires des cyanobactéries (NULTSCH, 1998).

I. 2.1.2.Paroi cellulaire

La paroi proprement dite contient des substances à haute poids moléculaire; dont les plus abondantes sont des protéines, des lipides, des polysaccharides et une substance particulière la mureine. Cette dernière est un mucopolymère dont les molécules forment un

réseau, qui donne sa constance à la paroi, cette molécule existe tant chez les bactéries que chez les cyanobactéries (GRASSE *et al*, 1963). Les cyanobactéries sont des bactéries GRAM-, ce qui signifie que, en plus de leur membrane plasmique et d'une paroi contenant de peptidoglycanes, elles sont recouvertes par une seconde membrane lipopolysaccharidique ; responsable de la coloration de GRAM-. Cette membrane est liée à la couche de peptidoglycane par des lipoprotéines pariétales (DE REVIERS, 2003).

I.2.1.3. Pigments

Ils sont nombreux, à savoir : la chlorophylle verte, phycoérythrine bleu-verte, la phycoérythrine rouge et des pigments d'accompagnement; carotène et xanthophylle rouge ou ochracés (GRASSE, et FEDMANN, 1963).

Du fait de la présence simultanée de ces différents pigments (en proportions variables) , ces algues prennent différentes couleurs ; rouges (*Trichodesmum erythraeum*), plus ou moins noirâtres (*Nostoc* commune) ou verdâtre (*Spiruline*) (DE REVIERS ,2003).

Chez les cyanobactéries existent la chlorophylle a et c ; l'absence de la forme b a été constatée dans diverses espèces. La forme c ou chlorofucine est un produit de dégradation de la chlorophylle a (GRASSE et FEDMANN, 1963).

I.2.2. Mode nutritionnel

Il s'agit d'organismes pour la plupart photosynthétiques donc autotrophes, (DE REVIERS ,2003). Les cyanobactéries pratiquent l'autotrophie grâce à leurs chromoplastes feuillés et imprégnés de chlorophylle (GRASSE et FEDMANN, 1963).

Les cyanobactéries réalisent la photosynthèse oxygénique et possèdent les deux photosystèmes, en utilisant comme donneur d'électrons l'eau, H₂S, H₂ ou des composés organiques (DE REVIERS ,2003).

Les cyanobactéries assimilent le carbone à travers le cycle de Calvin et stockent l'énergie et le carbone sous forme de glycogène. Les cyanobactéries varient considérablement dans leurs schémas métaboliques. Elles ont en commun l'absence de cycle de Krebs complet.

Beaucoup de cyanobactéries, surtout parmi les filamenteuses, sont capables de réduire (fixer) l'azote de l'air, grâce à des structures spécialisées appelées hétérocystes (FALQUET, 1996) .

Cependant, certaines espèces peuvent être hétérotrophes ; des Oscillaires, pigmentées, cultivées à l'obscurité, dans des milieux additionnés de sucre, d'amidon et d'inuline, deviennent hétérotrophes (GRASSE et FEDMANN, 1963).

I.2.3.Reproduction

Jusqu'ici aucun phénomène de sexualité n'a été rapporté relativement aux cyanobactéries. La division binaire des cellules assure la multiplication des espèces unicellulaires et la croissance dans les formes pluricellulaires. Tout individu d'une espèce unicellulaire ou toutes les cellules disposées en filament ou en chapelet ont la faculté de se multiplier par bipartition (GRASSE et FEDMANN, 1963) .

Il existe trois types de base de reproduction asexuée :

La fragmentation : le thalle se casse et chaque partie repousse pour former un nouveau thalle.

La sporulation : les spores peuvent être formées dans les cellules végétatives ordinaires ou dans les structures spécialisées appelées sporanges.

Scission binaire : elle se produit par division du noyau puis du cytoplasme.

I.2.4. Mobilité

La plupart des cyanobactéries sont capables de se déplacer, soit à l'aide de vésicules gazeuses (dans les liquides) soit, dans le cas des cyanobactéries filamenteuses, par glissement (jusqu'à 25 microns par seconde) grâce à des microfibrilles (FALQUET, 1996).

I.2.5.Ecologie

Les cyanobactéries, organismes panchroniques par excellence n'ont probablement que peu variées depuis le Précambrien (2700 Millions d'années ou plus), elles possèdent une grande adaptabilité et peuplent des milieux très variés ; beaucoup se contentent

même des terres humides. Les conditions les plus sévères à lesquelles la vie reste possible n'arrêtent pas leur vie active, ainsi les trouve-t-on dans les eaux très chaudes, des eaux très froides, dans les eaux douces et des eaux chargées en sels variés (GRASSE, et FEDMANN, 1963).

Entre certaines cyanobactéries et d'autres organismes s'établissent des relations symbiotiques. Soit associées avec des champignons pour constituer les lichens, soit dans les organes de quelques plantes supérieures (FELDMAN, 1985).

Certaines cyanobactéries sont attachées à la surface de diverses structures, tandis que d'autres mènent une vie parasitaire. Ainsi des cyanobactéries filamenteuses de la famille des Oxillaspiracées (ordre des Nostocales) vivent dans le tube digestif de divers vertébrés (ROGER, 1976).

I.2.6. Classification

Il en existe au moins 2 000 espèces, réparties dans plus de 150 genres (voir le tableau II).

Tableau II: Principaux ordres des cyanobactéries et leurs principaux genres.

Ordre	Caractères distinctifs	Principaux genres	caractère
Chroococcales	Unicellulaires ou multicellulaires ; non filamenteux presque toujours immobiles	Chamaesiphon Synechococcus Gloeotheca Microcystis	Division par bourgeonnement. Bacilles originaires d'eaux douces et marines, et de sources chaudes. Coque dans une gaine commune ; fixent l'azote. Coque ; vacuoles gazeuses ; peuvent provoquer des <i>vater blooms</i> toxiques
Pleurocapsales	Formation des béocystes	Dermocarpa	

Oxillatoriales	Filaments droits sans cellules spécialisées généralement mobiles et peuvent produire des hormogonies	Oxillatoria Trichodesmium Lyngbia Spiruline	Trichomes droites ; quelques vacuoles gazeuses ; dans les eaux douces ou chaudes
Nostocales	Filaments droits avec hétérocystes souvent mobiles et peuvent produire des akinètes	Anabaena Aphanizomenon Nostoc Rivularia Gleotrichia	Trichomes non effilés, la plupart mobiles par glissement ; beaucoup à vacuoles gazeuses
Stigonematales	Filaments ramifiés, peuvent produire des akinètes	Fischerella	

PERRY *et al* (2004)

I.3. La spiruline

Le groupe des cyanobactéries, anciennement appelées algues bleues, compte parmi l'une des plus anciennes formes de vie sur terre et constitue l'essentiel des bactéries capables de la photosynthèse avec production d'oxygène, parmi elles, existe le genre *Spirulina* ou *Arthrospira*, des cyanobactéries filamenteuses dont fait partie une bactérie particulièrement intéressante dénommée *Spirulina platensis* (ou *Arthrospira platensis*) plus connue sous le nom de Spiruline (Sébastien, 2008) .

Consommée depuis des siècles par certains peuples primitifs d'Afrique et d'Amérique, et connue par les scientifiques depuis plusieurs décennies pour sa richesse nutritionnelle, elle fait l'objet d'une redécouverte depuis quelques années (Sébastien, 2008) .

Compte tenu de ses caractéristiques, la culture de la spiruline pourrait être une solution pour améliorer la santé humaine, la nutrition notamment dans les pays du tiers-monde et également pour développer des cultures industrielles. Cette cyanobactérie semble actuellement l'une des meilleurs solutions pour la production simple d'un complément alimentaire de haute qualité et, du fait, de grandes entreprises se sont lancées dans la culture de cet organisme à une échelle industrielle (Sébastien, 2008) .

Outre des propriétés nutritionnelles avérées, la spiruline connaît aujourd'hui un regain d'intérêt de la part de la communauté scientifique internationale du fait de sa possible utilisation comme source de produits à vertus thérapeutiques. En effet, le potentiel de cette micro-algue semble être important et ceci principalement grâce à son principal pigment, la phycocyanine, donnant à cet organisme sa couleur bleue-verte caractéristique (Sébastien, 2008) .

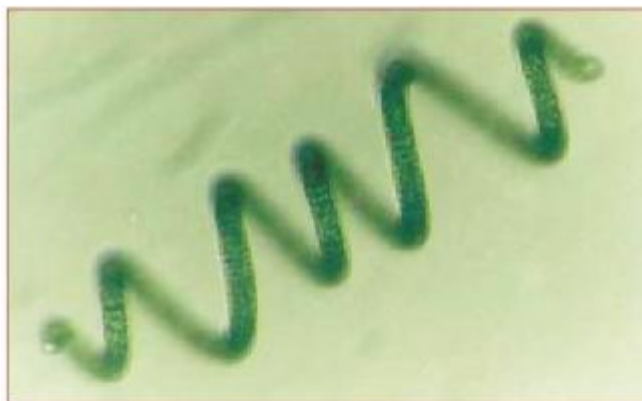


Figure 2 : Vue au microscope optique (G 100x10) des filaments de spiruline (Murielle, 2010).

I.3.1. Historique de la spiruline

Algue microscopique en forme de spirale, la spiruline (*Arthrospira platensis*) est une des premières formes de vie sur terre. On parle d'algue, c'est plus précisément une cyanobactérie, c'est à dire une bactérie réalisant la photosynthèse. L'origine de la terre remontant à 4,5 milliards d'années, les cyanobactéries apparurent vers 3,5 milliards d'années (Gustavson *et al*, 2000).

Grâce à l'énergie lumineuse, la spiruline est désormais capable de transformer le gaz carbonique en matière organique, au cours d'un processus complexe qui dégage de l'oxygène. Ceci a permis l'enrichissement de l'atmosphère en oxygène (O₂) puis la formation d'ozone (O₃) protégeant ainsi la terre des rayonnements ionisants. (Gustavson *et al*, 2000).

Les aztèques Consommaient de la spiruline. Le conquistador espagnol Cortès rapporte dans ses mémoires cette curieuse habitude qu'avaient les indiens de promener à la surface des lacs des filets très serrés pour récolter une sorte de boue verte qu'ils faisaient sécher au soleil pour la consommer ensuite sous forme de galette (Gustavson *et al*, 2000) .

Dans la région du Kanem, au Nord-est du Tchad, vivent les Kanembous . De tradition immémoriale, les femmes kanembus récoltent à la surface de certaines mares fréquentées par les flamants roses, une sorte de bouillie verte qui y pousse spontanément : la spiruline, une fois séchée en galette (dihé) dans le sable, celle-ci trouve son chemin jusqu'au' marché local ou directement dans la marmite. La spiruline s'accorde idéalement avec la boule de mil qui est à la base de l'alimentation de cette région (Gustavson *et al*, 2000) .

Dans les 10 dernières années, les cultures intentionnelles et intensives de spirulines se sont implantées en plusieurs endroits du monde. La culture industrielle a repris sur le lac au Mexique en 1976 par la société Sosa Texcoco. Depuis, plusieurs entreprises se sont implantées un peu partout : Siam Algae Company à Bangkok en 1979, Earthrise farm aux Etats-Unis en 1983 (le plus gros producteur actuel), Cyanotech Corporation à Hawaï, etc. En 1995, il existait une vingtaine d'exploitations industrielles dans le monde. Actuellement, leur nombre avoisine la trentaine et les techniques de la biotechnologie moderne permettent d'obtenir un produit de haute qualité, contenant jusqu'à 70 % en poids sec de bonnes protéines alimentaires (Sébastien, 2008) .

I.3.2. Classification

La Spiruline était à l'origine considérée comme une algue. Cependant, en 1960 une claire distinction entre procaryote et eucaryote a été définie, basée sur la différence d'organisation cellulaire : les procaryotes regroupent les organismes dépourvus de compartiment cellulaire tandis que les eucaryotes regroupent ceux qui possèdent des organelles, c'est à dire des nucléoles et des mitochondries (Isabelle *et al* , 2002) .

Tableau III: Systématique de la spiruline.

REGNE	MONERA
SOUS-REGNE	PROCARYOTA
PHYLUM	CYANOPHYTA
CLASSE	CYANOPHYCEAE
ORDRE	NOSTOCALES
FAMILLE	OSCILLATORIACEAE
GENRE	ARTROSPIRA
ESPACE	A.PLATENSIS

ISABELLE *et al* (2002)

En 1962, Stanier *et al* constataient que cette algue bleue-verte était dépourvue de compartiments cellulaires, et donc faisait partie des procaryotes ; ils proposaient de désigner ce microorganisme «Cyanobactérie». Cette nouvelle désignation est finalement acceptée et figure pour la première fois au «Bergey's Manual of Determinative Bacteriology en 1974» (JARISOA, 2005) .

Cette micro-algue change de forme en fonction des caractéristiques physiques et chimiques du milieu, dans lequel, elle se trouve. Mais on remarque aussi que dans un même milieu on trouve des variétés des formes . C'est peut être là l'origine de la confusion entre les termes Spirulina et Arthrospira (JARISOA, 2005).

I.3.3. 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, qui ressemble à un minuscule ressort à boudin, d'où le nom de «Spiruline» (Geitler, 1932). On trouve cependant des Spirulines ondulées et parfois droites (JARISOA, 2005).

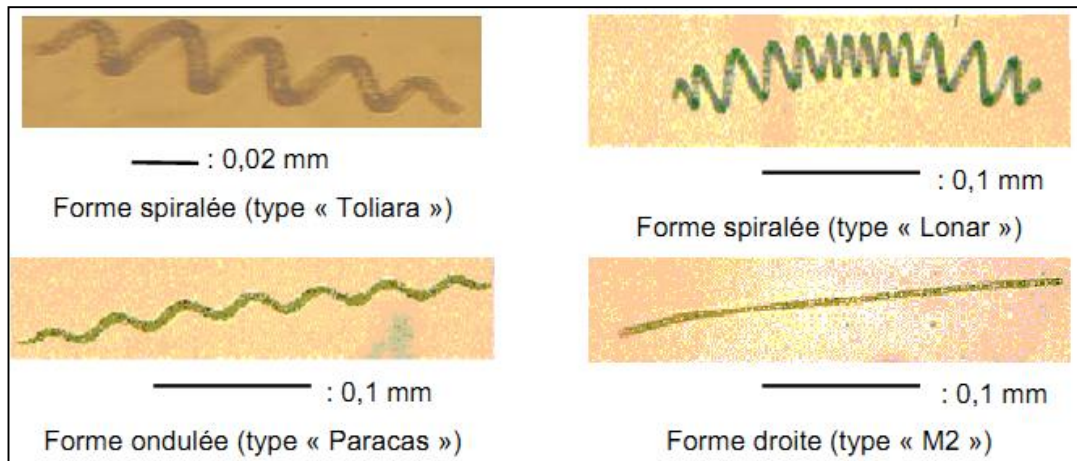


Figure 3 : Morphologies typiques de Spiruline Source : Antenna Technologie modifiée (JARISOA, 2005).

Ces différentes formes dépendent des conditions écologiques dans lesquelles vivent les Spirulines. Une étude (basée sur la caractérisation moléculaire de l'ITS [Internally Transcribed Space] de l'opéron ARN ribosomal) portant sur la diversité génétique de 51 souches d'*Arthrospira* provenant de 4 continents arrive à la conclusion que les génotypes sont très conservés et correspondent peut-être à une ou deux espèces génétiques (Wilmotte et al., 2004). Cela laisse supposer que le nombre d'espèces du genre est réduit.

I.3.4. Bio-Écologie

La Spiruline est composée de cellules transparentes empilées bout à bout pour former un filament ou trichome enroulé en forme hélicoïdale. Cette rotation du trichome sur lui-même se fait suivant un sens déterminé, dans le sens des aiguilles d'une montre, si on regarde par-dessus la spirale en descendant (Jourdan , 1999).

Elle semble avoir une valeur spécifique mais la cause en reste indéterminée. Grâce à cette morphologie, elle se déplace dans l'eau en adoptant le mouvement d'une vis. Le cycle biologique de la Spiruline selon Balloni *et al* est représenté dans la figure 4 (JARISOA, 2005)

Filament en maturité forme des cellules spéciales appelées nécridies, des disques de séparation biconcaves. Au niveau de ces cellules le trichome se fragmente pour donner naissance à des nouveaux individus de courtes chaînes (2 à 4 cellules) appelées hormogonies. Par division binaire des cellules, les hormogonies croissent en longueur et prennent la forme typiquement hélicoïdale.

Dans les conditions expérimentales, le temps de génération maximal de la Spiruline est voisin de 7 heures (JARISOA T, 2005) .

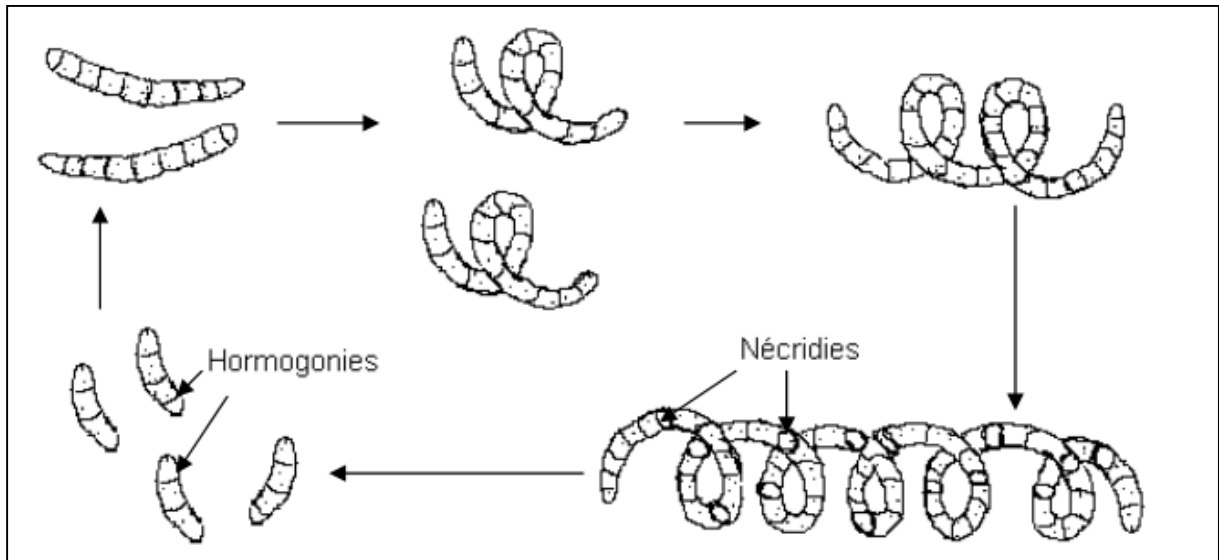


Figure 4 : Cycle biologique de la Spiruline selon Balloni et al (JARISOA, 2005).

La Spiruline est un organisme ubiquiste. Elle se développe préférentiellement dans des eaux chaudes tropicales du monde entier, principalement, dans les lacs alcalins d'Afrique autour du Tchad (*Spirulina platensis*) et d'Amérique dans la vallée de Texcoco au Mexique (*Spirulina geitleri* ou *S. maxima*).

Elle est thermophile, son besoin en lumière et en température a limité son aire de répartition naturelle à une bande située approximativement entre 35 ° de latitude Nord et 35° de latitude Sud (JARISOA, 2005) .

I.3.5 . Les gisements naturels dans le monde

La présence d'un gisement naturel de Spiruline dans un lac ou une mare n'est pas due au hasard, mais aux différents facteurs climatiques et pédologiques qui rendent favorable le développement de ce microorganisme. Les milieux privilégiés sont alcalins et riches en nutriments azotés et phosphorés. Ils sont de plus bien éclairés et présentent une température élevée. De telles conditions se trouvent naturellement dans de nombreux sites répartis sur la ceinture intertropicale.

Le Tableau IV présente des sites possédant des gisements naturels de Spiruline localisés dans différents pays du monde entier d'après Fox (1999b) (JARISOA, 2005) .

Tableau IV : Sites de gisements naturels de Spiruline dans le monde selon FOX (1999) .

Payes d'Afrique	Sites
Algérie	Tamanrasset(E. Boileau,1988)
Tchad	La région du Kanem :les lacs Latir, Ouna, Borkou, Katam, Yoan, Leyla, Bodou, Rombou, Morliwa, Iseiron, Ounianga Kebir
Soudan	Cartère du Djbel Marra
Djibouti	Lac Abber
Ethiopie	Lacs Aranguadi, Lesougouta, Nacourou , Chillu, Navasha, Rodolphe
Congo	Moungounga
Kenya	Lac Nakuru, Elmenteita, Cratère, Natron
Tanzanie	Lac Natron
Tunisie	Lac Tunis (M.Belkir,1978), Chott el jerid (M.Belkir,1997)
Zambie	Lac Bengweoudou
Madagascar	Beaucoup de petits lacs près de Tolira(Nguyen Kim Ngan, 1994)
Asie	
Inde	Lac Lonar(Damle, 1978), un réservoir près de Madurai(J. Bai, 1984), une réserve près de Calcutta(K .Biswas), Lac Nagpur(S. Pargaonkar, 1981)
Myanmar	Lacs Twyn Taung, Twyn Ma et Taung Pyank(Min Thien, 1984)
Sri lanka	Lac Beira
Pakistan	Mares près de Mlahore(R. D. Fox, 1980 ; Ghose, 1924)
Thaïlande	Lacs d'effluents d'une usine de tapioca, province de Radburi, 80 km au S.O de Bangkok (Marakot Tanticharoen, 1924)
Azerbaïdjan	(Woronichin, 1924)
Amérique du sud	
Pérou	Lac Huacachina, près d'Ica, maintenant rempli d'eau douce, il ne contient plus de spiruline. Lac Orovilca (R.Lopez, 1980) , maintenant asséché, Lac Ventanilla, sur la cote près de Lima (M. Figuera, 1987) : on n'en trouve plus actuellement. Réservoir d'eau près de paracas (G.Planchon & R .Fuentes, 1993)
Mexique	Lac Taxcoco (M.David, 1976). Lac Cratère (H. Durrand Chastel, 1990)
Uruguay	Montevideo, signé par Arechavaleta in Witlock & Nordstedt (1884)
Pérou	Trouvé en association avec <i>Cladophora</i> près de l'île d'Amantani dans le lac Titicaca (R.D. Fox, 1993), spécimen de <i>Cladophora</i> de Gilles Planchon & Rosario Fuentes
Equateur	Lac Quilotoa : cratère de diamètre 1km (Yann Leroux, 1998)

Amérique du nord	
Californie	Okland, Key Route Power House (N. L. Gardner, 1917 à, Del Mar Beach (R. A. Lewin, 1994) . Un moulin à huile (Knutsen G.,1994)
Haiti	Lac Gonave(M. Pierre,1986)
République dominicaine	Lac Enriquillo (H. Durand-Chastel, 1993)
Europe	
Hongrie	(J. Kiss, 1957)
France	Camargue(G. Plachon & R. Fuentes, 1994)
Autres sites possibles	
	Partout où vivent et se reproduisent le flamant nain, <i>phoenocnaias minor</i> , en Afrique et en Asie, et le flamant de James, <i>phoenicoparrus jamesi</i> , en Amérique du sud(Ogilvie M. et C. , 1986)
Ethiopie	Lac Abiata
Kenya	Lac Rodolphe, Lac Hannington
Tanzanie	Lac Manyara, Lac Rukua
Zambie	Lac Mweru
Botswana	Makgadikgadi Salt Pans
Namibie	Etosha Salt Pan
Afrique du sud	Etat Libre d'Orange, près de Vaaldam
Bolivie	Lac Colorado, Pooppo, Challviri, Salar de Uyuni
Chili	Agua Calientes, Lagunas Brava, Lac Vilama, Salar de Surire
Mauritanie	Cote Sud
Inde	Rann of Kutch, Gujarat
Madagascar	Cote Ouest – Toliara

JARISOA (2005)

CHAPITRE II

***Composition chimique et biochimique
et valeur nutritionnelle de la spiruline***

II.1. Composition chimique et biochimique de la spiruline

La spiruline est un aliment naturel qui a des valeurs nutritionnelles exceptionnelles. Championne toute catégorie, elle contient plus de protéines, de bêta-carotène, de vitamine B 12, de fer, et d'acide gamma linolénique qu'aucun autre aliment connu. La spiruline est extrêmement riche en protéines puisqu'elle en contient près de 70% (soit trois fois plus que le poisson et la viande maigre) (Falqet, 2006).

Complète, équilibrée et dépourvue de graisse et de cholestérol, la teneur protéique de cette micro-algue, riche des 8 acides aminés essentiels à l'organisme, font de la spiruline un aliment d'une haute valeur biologique. A noter l'excellente biodisponibilité de ses protéines puisque le taux d'assimilation est 60 % plus facile que celles contenues dans la viande (Falqet, 2006).

Par ailleurs, la spiruline est pourvue de la plupart des vitamines, elle fournit une quantité phénoménale de bêta-carotène (15 fois plus que dans les carottes) et apporte à l'organisme toutes les vitamines du groupe B, dont la vitamine B12 qu'elle contient proportionnellement 4 fois plus que dans le foie. En outre, on retrouve dans cette algue de nombreux minéraux et oligo-éléments : calcium, phosphore, magnésium, potassium, sodium, cuivre, zinc, manganèse, et du fer en grande proportion (45 fois plus que dans les épinards) (Falqet, 2006).

Sa très haute teneur en fer est à souligner doublement du fait que les carences en fer sont très répandues (anémies), surtout chez les femmes enceintes, les enfants, les adolescentes et les sportifs, et que les bonnes sources alimentaires de fer sont rares.

La spiruline contient également des acides gras essentiels Omega 3 et 6, qui se montrent extrêmement bénéfiques au niveau des apports énergétiques mais également en ce qui concerne le métabolisme du cholestérol. Entre autre, elle a l'avantage d'être une riche source d'acide gamma-linolénique (AGL), un acide gras insaturé issu de la famille des omégas 6, qui s'avère particulièrement utile dans la prévention du vieillissement cutané et l'hydratation de la peau (Falqet, 2006).

Tableau V : les principaux constituants chimiques et biochimiques de la spiruline .

Composition nutritionnelle	Composition pour 10g	% AJR	role
Protéines (vétales)	55 à 70 %	-	Construction du corps
Glucides	15 à 25 %	-	Apport de l'énergie à l'organisme
Lipides	4 à 7 %	-	Réserve énergétique, fabrication des hormones ,bon fonctionnement de l'organisme
Méniraux	7 à 13 %	-	(voir plus bas)
Fibres	2 à 8 %	-	Amélioration du transit intestinal
Vitamines			
A (Béta-carotène)	14 mg	100 %	Vision , croissance , antioxydant
E	1 mg	10 %	Lutte contre le vieillissement
B1	0,35 mg	30 %	Participe à l'équilibre du système nerveux , des muscles et du cerveau
B2	0,4 mg	30 %	Lutte contre le vieillissement de la peau rides ,lésions oculaires
B3	1,4 mg	9 %	Indispensable au bon fonctionnement des cellules du cerveau et du système nerveux
B5	0,01 mg	0,2 %	Accroît la résistance à la fatigue et au stress et combat le vieillissement cellulaire
B6	0,01 mg	4 %	Facilite la digestion et l'assimilation des aliments , stimule le système immunitaire
B8	0,005 mg	0,5 %	Appétit , perte de cheveux
B9	0,01 mg	2,5 %	Nécessaire à la croissance et à la division des cellules
B12	0,032 mg	1000 %	Fatigue , circulation , croissance
I	6,4 mg	-	Action sur le système nerveux , anticancéreux
K	0,224 mg	300 à 500 %	Favorise la coagulation , lutte contre le vieillissement
Minéraux			
Calcium	100 mg	10 %	Nécessaire à la formation des os et des dents , à la croissance et à la coagulation du sang , aux transmissions nerveux , à la croissance et aux contractions musculaires

Fer	18 mg	100 %	Essentielle à la formation de l' hémoglobine et au transport de l' oxygène dans le sang . il accroît la résistance à la fatigue , aux infections et au stress
Magnésium	40 mg	20 %	Très important dans le fonctionnement des cellules , de l' influx nerveux , à la contraction et au développement des muscles , à la formation des anticorps
Phosphore	80 mg	8 %	Stimule la croissance et la mémoire
Potassium	140 mg	5 %	Rôle essentiel dans la perméabilité des membranes des cellules . Il régularise le rythme cardiaque et la tension artérielle , améliore les facultés mentales et oxygène le cerveau
Zinc	0,3 mg	3 %	Stimule le système immunitaire , action anti oxydante , favorise la croissance
Cuivre	0,12 mg	5 %	Entretien des cartilages et des os , lutte contre les infections , bon fonctionnement du cœur
Manganèse	0,5 mg	17 %	Participe à l'utilisation des glucides et des lipides par l'organisme , lutte contre les radicaux libres
Sodium	0,09 mg	-	Régulation de l'acidité et de la répartition de l'eau dans l'organisme , contribue au bon fonctionnement musculaire
Chrome	0,028 mg	16 %	Intervient dans le métabolisme des glucides
Sélénium	0,002 mg	2 %	Antioxydant , détoxiquant , renforce le système immunitaire
Acide gras essentiels			
Acide linoléique	80 mg	-	Stimule le système immunitaire
Acide gamma-linoléique	100 mg	-	Stimule le système immunitaire , la peau , les cheveux
Acides aminés essentiels			
Isoleucine	350 mg	50 %	Améliore la coordination musculaire et la réparation des tissus, normalise le taux d'azote dans les muscles, diminue le taux de sucre dans le sang, lutte contre les manifestations hypoglycémiques, augmente la résistance

			aux efforts physiques, favorise le métabolisme musculaire
Leucine	540 mg	49 %	Diminue le taux de sucre dans le sang , aide à régénérer et à réparer les tissus musculaires régule le taux d'azote dans les muscles, augmente la résistance aux efforts physiques
Lysine	290 mg	36 %	Participe à la formation des anticorps et à régénération de tissus endommagés, stimule le système immunitaire et endocrinien, prévient les éruptions cutanées, aide à lutter contre le manque d'énergie et d'appétit, aide au problème de retard de croissance chez l'enfant, facilite la formation du collagène
Méthionine	140 mg	70 %	Puissant antioxydant qui neutralise les radicaux libres et prévient le vieillissement, favorise la lutte contre la dépression, les troubles du comportement, l'hypertension, les problèmes rénaux, aide à l'élimination des métaux lourds
Phénylalanine	280 mg	140 %	Antidépresseur naturel, améliore la mémoire, participe à la désintoxication de l'alcool et des drogues
Thréonine	320 mg	64 %	Participe à la formation de l'élastine et du collagène, à la croissance des cartilages et des ligaments, à l'équilibre protéique de l'organisme et au fonctionnement du système nerveux central
Tryptophane	90 mg	36 %	Antidépresseur, anxiolytique, combat la dépendance à l'alcool et aux drogues, augmente la tolérance à la douleur, soulage des migraines et des douleurs dentaires
Valine	400 mg	50 %	Stimulant naturel, il améliore la résistance aux efforts physiques, améliore la glycémie, participe à la régénération et à la réparation des tissus musculaires

Falquet (2006)



Figure 5 : composition nutritionnelle pour 10g de spiruline (Falquet, 2006).

II.2. Valeur nutritionnelle de la spiruline

II.2.1. Les Protéines

II.2.1.1. Quantité, composition

Du point de vue quantité, la teneur en protéines de la spiruline oscille entre 50 et 70 % de son poids sec. Ce sont des valeurs exceptionnelles car les meilleurs sources de protéines végétales n'arrivent qu'à la moitié de ces teneurs. La farine de soja par exemple ne contient que 35 % de protéines brutes (DEOGRATIAS , 2003) .

Tableau VI: rapports d'efficacité protéique comparés, intérêt des complémentations.

Diète	Rapport d'efficacité protéique
spiruline	1,90
Mais	1,23
Riz	2,20
Blé	1,15
Riz + spiruline(3:1)	2,35
Riz + spiruline(1:1)	2,40
Blé + spiruline(3:1)	1,42
Blé + spiruline(1:1)	1,90
Mais + spiruline(3:1)	1 ,80
Mais + spiruline(1:1)	1,72
Mais + avoine +spiruline (3:2:5)	1,90
Mais + riz + spiruline(2:2:1)	1,95

FALQUET (2006)

II.2.1.2. Qualité :

Du point de vue qualitatif, les protéines de la spiruline sont complètes car tous les acides aminés essentiels y figurent (la leucine, Isoleucine, la valine, la thréonine, la cystéine, la méthionine, la phénylalanine, la tyrosine (DEOGRATIAS , 2003).

Les plus faiblement représentés sont les acides aminés soufrés : la méthionine et la cystéine. Mais par complémentation avec une bonne source d'acides soufrés et éventuellement de lysine et/ou d'histidine : les céréales comme le riz, le blé et le millet ou certains oléagineux comme le sésame devraient être d'excellents compléments. Les populations du Tchad qui consomment de la spiruline l'associent au mil qui est spécialement riche en méthionine et cystéine (DEOGRATIAS , 2003).

II.2.1.3. Utilisation protéique nette

Contrairement à d'autres micro-organismes proposés comme sources de protéines (levures, chlorelles...), la spiruline ne contient pas de parois cellulosiques, mais une enveloppe de muréine, c'est-à-dire glucosamines et d'acides uraniques relativement fragile. Ce fait explique la très bonne digestibilité des protéines de la spiruline, Simplement séchée : 83 à 90 % (DEOGRATIAS , 2003).

Ainsi la spiruline ne nécessite ni cuisson, ni traitements spéciaux destinés à rendre ses protéines accessibles. C'est un avantage considérable tant du point de vue simplicité de production que pour la préservation de constituants de hautes valeurs tels que vitamines et acides gras poly insaturés. La valeur de l'utilisation de la spiruline est estimée entre 53 et 61 % soit 85 à 92 % de celle de la caséine (DEOGRATIAS , 2003).

II.2.2. Les lipides

II.2.2.1. Les lipides totaux

Du point de vue quantitatif la teneur en lipides totaux de la spiruline oscille entre 5,6 à 7 %. du poids sec, d'autres sources vont jusqu'à obtenir plus de 11 % de lipides totaux par un meilleur système d'extraction. Ces lipides totaux peuvent être séparés en lipides totaux saponifiables 83 % , surtout composés de monogalactosyl diglycéride et digalactosyl diglycérides 23 % , de sulfoquinovosyl diglycérides 5 % et de phosphatidyl glycérol 25,9 %. Il y a absence phosphatidyl choline et phosphatidyl éthanolamine (DEOGRATIAS , 2003).

Tableau VII :la répartition des acides gras pour deux souches des spiruline.

Répartition des acides gras pour deux souches des spiruline		
Acides gras	Spirulina maxima(% des acides gras)	Spirulina platensis(% des acides gras)
Palmitique(16:0)	63	25,8
Palmitoléique(16:1ω6)	2	3,8
Stéarique(18:0)	1	1,7
Oléique(18:1ω6)	4	16,6
Linoléique(18:2ω6)	9	12
γ-linolénique(18:3ω6)	13	40,1
α-linolénique(18:3ω3)	traces	Traces

DEOGRATIAS (2003)

Les lipides totaux insaponifiables (17%) contenant essentiellement une paraffine, des pigments, des alcools terpéniques et des stérols. Les principaux acides gras de la spiruline sont représentés dans le tableaux (DEOGRATIAS, 2003) .

II.2.3. Les glucides

Glucides : entre 15 et 25% de la matière sèche. Les glucides simples sont en très faible quantité, ce qui est plutôt un avantage sur le plan diététique. La spiruline contient par ailleurs du méso-inositol phosphate, excellente source de phosphore organique. Les polysaccharides de la spiruline présentent de multiples intérêts thérapeutiques, notamment dans la stimulation des mécanismes de réparation de l'ADN, dans son effet radio-protecteur et dans la neutralisation des radicaux libres (Christophe, 2007) .

II.2 .4. Les acides nucléiques

La teneur en acides nucléiques est un point nutritionnel important car la dégradation biochimique d'une partie de leurs composants (les purines : adénine et guanine) produit en dernier lieu de l'acide urique. Or une élévation du taux d'acide urique plasmatique peut produire à la longue des calculs rénaux et des crises de goutte.

Chez *A. Platensis* comme chez *A. Maxima*, on rapporte des valeurs de 4.2 à 6% d'acides nucléiques totaux dans la matière sèche. La teneur en acides nucléiques de la spiruline est très inférieure à celle de la majorité des microorganismes unicellulaires (FALQUET, 1996). Le tableau III donne une idée de la teneur en acides nucléiques totaux de quelques aliments (BERNARD, 2008).

Tableau VIII : teneur en acides nucléiques de quelques aliments

Aliments	Acides nucléiques totaux (% mat. sèche)
Viande de bœuf	1,5
Foie de bœuf	2,2
spiruline	4-6
Levure	23

FALQUET (2006)

II.2.5. Les vitamines

Il existe 13 vitamines, 4 liposolubles (A, D, E, K) et 9 hydrosolubles (B1, B2, B5, B6, B12, C, PP).

La spiruline contient de nombreuses d'entre elles et spécialement des vitamines B dans des proportions optimales (Sébastien, 2008).

II.2.5.1. Vitamines hydrosolubles

Les vitamines constituent le principal facteur impliqué dans les propriétés biologiques des spirulines. Les vitamines identifiées en majorité chez *Spirulina platensis* sont (pour 100g de biomasse) : la vitamine C (42,0-195,3 mg), la vitamine B3 (0,6-5,3 mg), la vitamine B1 (0,8-15,4 mg), la vitamine B2 (0,2-0,9 mg), la vitamine B6 (0,3-4,0 mg), la vitamine B9 (0,2-0,6 mg) et la vitamine B12 (0,3-0,8 mg) (Sébastien, 2008).

Il faut noter que la biomasse poussant en printemps-été montre une proportion en vitamines plus élevée. Ceci dépendant essentiellement des conditions d'ensoleillement (Tableau IX).

Tableau IX : Vitamines hydrosolubles contenues dans la biomasse de *Spirulina platensis* en fonction des saisons (mg/100g de matière sèche)

Vitamines hydrosolubles	Echantillon recueilli en hiver	Echantillon recueilli en automne	Echantillon recueilli en été	Echantillon recueilli au printemps
Acide ascorbique (Vit C)	42,8	42	106,2	195,3
Nicotinamide (Vit B3 ou PP)	5,3	0,6	0,4	0,9
Pyridoxine (Vit B6)	4	0,6	0,3	0,5
Riboflavine (Vit B2)	0,8	0,7	0,9	0,2
Thiamine (Vit B1)	11,6	15,4	0,8	0,8
Cyanocobalamine (Vit B12)	0,4	0,8	0,3	0,3
Acide folique (Vit B9)	0,6	0,4	0,2	0,6

Sébastien (2008)

Concernant la vitamine B9, Sall. et al. (1999) indiquent une valeur allant jusqu'à 100 mg d'acide folique mais ne précisent pas s'il s'agit d'une valeur mesurée chez l'espèce *platensis* ou *maxima* (Sébastien, 2008).

II.2.5.2. Vitamines liposolubles

Les trois vitamines liposolubles trouvées chez la spiruline sont le β -carotène, précurseur de la vitamine A, la vitamine E et la vitamine D (Tableau X).

Tableau X : Vitamines liposolubles contenues dans la biomasse de *Spirulina platensis* (mg/100g de matière sèche)

vitamines	Quantités
β -carotène (provitamines A)	64 à 200 mg /100g
Tocophérol (Vitamine E)	10 à 19 mg/100g
Vitamine D	12000 U soit 0,3 mg/100g

Sébastien (2008)

III .2.6. Les minéraux et oligo-éléments :

Les minéraux spécialement intéressants chez la spiruline sont le fer, le zinc, le magnésium, le calcium, le phosphore et le potassium. La très haute teneur en fer de la spiruline cultivée (550-600 mg/kg) est à souligner doublement du fait que les carences en

fer sont très répandues (anémies ferriprives), surtout chez les femmes (enceintes, allaitantes) et les enfants et que les bonnes sources alimentaires de fer sont rares . (BUJARD, 1970)

Le calcium joue un rôle biologique considérable en particulier dans la constitution des os et des dents mais également les humeurs et les tissus (CLEMENT, 1978).

Tableau XI: Teneur en oligoéléments dans la spiruline

Minéraux	Teneur de spiruline	Doses requises (mg / jour)
Calcium	1300-14000	1200
Phosphore	6700-9000	1000
Magnésium	2000-4000	2500-350
Fer	600-6000	18
Zinc	21-6000	15
Cuivre	8-2000	1,5-3
Chrome	2,8	0,5-2
Manganèse	25-37	5
Sodium	4500	500
Potassium	6400-15400	3500
Sélénium	0,01-50	0,05

FOX (1999)

II.2.6. 1 .Calcium

Le calcium est le constituant principal des os (environ 90%) qui est un tissu en perpétuel renouvellement. Son assimilation, nécessite de la vitamine D, des sucres fermentescibles et un rapport équilibré Ca/P et peut être, dans certaines conditions, limitée au niveau intestinal et rénal. Son rôle est capital pour la croissance, la régularisation du rythme cardiaque, le bon fonctionnement du système nerveux ou encore dans l'assimilation de certaines vitamines ou du fer. Mais le phénomène d'acidose peut dégrader considérablement le capital osseux.

La spiruline constitue une excellente source de calcium assimilable pouvant notamment être utilisée dans les cas d'intolérance au lactose ou de personnes consommant peu de produits laitiers (Déborah, 2006) .

II.2.6 .2 Magnésium

Le magnésium est un élément ubiquitaire qui intervient comme co-facteur de presque toutes les enzymes des voies énergétiques, des réactions de phosphorylation-dephosphorylation, il favorise l'absorption du calcium par l'os, module la réactivité au stress, augmente l'activité du système immunitaire et a une action bénéfique sur de nombreux problèmes cardiaques (hypotension, arythmie, infarctus du myocarde...).

Au niveau alimentaire, le magnésium est principalement apporté par le cacao, les légumineuses secs, les eaux minérales et les fruits à coques. La spiruline représente une source naturelle biodisponible pour l'homme très intéressante en magnésium, entre autre par sa teneur en chlorophylle (Déborah, 2006).

II.2.6 .3 Phosphore

L'organisme contient environ 900mg de phosphore, dont 80 à 85% sont situés dans les os et les dents (associés au calcium), le reste entrant dans la composition des phospholipides (un type de graisses), constituants importants des membranes cellulaires.

Il est essentiel à presque toutes les réactions chimiques au sein des cellules, dans le métabolisme des graisses et des sucres, il aide à maintenir l'équilibre acido-basique dans l'organisme et en tant que constituant important de l'ATP, il permet la mise en réserve et la libération d'énergie.

Essentiellement présent dans les aliments riches en protéines, la spiruline en apporte naturellement une quantité non négligeable. De plus, le calcium, le phosphore et le magnésium sont présents dans la spiruline en quantités comparables à celles trouvées dans le lait. Les quantités relatives de ces éléments sont équilibrées ce qui exclut le risque de décalcification par excès de phosphore et en font une source intéressante (Déborah, 2006).

II.2.6. 4 Fer

Le fer est un minéral très répandu dans le corps. Ses rôles sont multiples, de la stimulation du système immunitaire à l'oxygénation du corps. Il a la particularité d'être assez rarement biodisponible dans les aliments d'origine végétale en contenant le plus (céréales complètes).

Cause due bien souvent aux tanins et aux phytates qui empêchent sa métabolisation. La spiruline a un taux de fer élevé qui s'est révélé tant chez le rat (Johnson, 1986 ; Kapoor, 1993b) que chez l'homme (Puyfoulhoux, 2001) d'une très bonne

biodisponibilité. Cette dernière étude montre que le fer de la spiruline est mieux absorbé que celui de la viande, ce qui est exceptionnel pour un fer non-hémique.

Naturellement, la spiruline contient du fer mais l'ajout de sels de fer dans son milieu de culture augmente sa teneur qui peut alors doubler (Déborah, 2006) .

II.2.6.5 Zinc

Le zinc est un oligo-élément qui intervient dans le bon fonctionnement du système immunitaire chez les animaux supérieurs dont l'homme, dans la croissance et le développement cognitif.

Son absorption se fait au niveau de l'intestin grêle et sa biodisponibilité est réduite par l'absorption simultanée de phytates ou de tanins. Les meilleures sources sont en générale les protéines animales.

La quantité de zinc présente dans la spiruline varie d'un échantillon à l'autre et est conditionnée par l'apport de zinc dans la solution nutritive apportée dans les bassins de culture.

Naturellement, la spiruline en contient très peu mais un enrichissement à la culture peut en faire une source intéressante. La biodisponibilité du zinc de la spiruline n'a pas encore testée mais on peut soupçonner, au regard de la bonne biodisponibilité du fer et du magnésium, qu'il en sera de même pour le zinc (Déborah, 2006) .

II.2.6.6 Selenium

Le sélénium est l'oligo-élément antioxydant de référence qui semble agir en synergie avec la vitamine E dans la destruction des radicaux libres. En plus de ce rôle, il a une action importante sur l'immunité, la prévention des maladies cardio-vasculaires, la réduction des rhumatismes et la préservation de la vision.

Les doses de sélénium trouvées naturellement dans la spiruline sont bien en dessous des doses recommandées et d'une très bonne biodisponibilité.. Par contre, des expérimentations d'enrichissement de spiruline ont été effectuées. Il en résulte une spiruline fortement dosée qui pourrait poser des problèmes de surdosage à la consommation (sélénose) mais également une exposition dangereuse pour les ouvriers rajoutant ce sélénium dans les bassins de culture.

Ces techniques sont rarement mises en place et si elles le sont, elles sont signalées par le vendeur (Déborah, 2006) .

II.2.6.7 .Les pigments

La phycocyanine est constituée d'une structure protéique reliée à un chromophore. C'est un pigment assez rare dans la nature qui absorbe la lumière dans une longueur de 61 à 650 nanomètres.

Elle est représentée à environ à hauteur de 10 à 11% en moyenne dans la spiruline.

Appréciée comme colorant bleu naturel dans l'industrie agroalimentaires, de nombreuses recherches sont en cours pour connaître toutes ses propriétés.

Sa structure particulière lui confère des propriétés antioxydantes, antiradicalaires et détoxifiantes. La phycocyanine stimulerait également la production des globules rouges et des globules blancs.

La chlorophylle est un pigment essentiel de la photosynthèse puisqu'elle transforme l'énergie lumineuse en énergie chimique. Constituée d'un atome de magnésium en son centre, la chlorophylle est parfois comparée à l'hémoglobine qui possède quant à elle un atome de fer.

La spiruline en contient environ 1%, ce qui stimulerait les fonctions de presque tous les organes.

Les caroténoïdes sont des pigments non azotés dont la coloration varie du jaune au rouge. La plupart des caroténoïdes sont des provitamines A indispensables aux hommes et aux animaux.

La spiruline en contient entre 20 et 25 fois plus que les carottes. Le bêta carotène représente 80% des caroténoïdes présents.

Les caroténoïdes ont une action anti radicalaire. Ils participent également à la croissance et au développement de l'individu, ainsi qu'au maintien de la vision nocturne (Déborah, 2006) .

II.2.6. 8. Métaux

La recherche des métaux chez les spirulines est réalisée pour l'étude de la toxicité potentielle plus que pour la mesure quantitative en éléments fonctionnels. Cependant, certains métaux comme le sélénium et le chrome sont nécessaires dans l'alimentation à des doses faibles (Sébastien, 2008) .

CHAPITRE III

Conditions de culture de la spiruline et domaines d'utilisation

III.1. La culture de la spiruline

Les cyanobactéries, famille de microorganismes à laquelle on inclut la spiruline, sont des bactéries Gram négative, faisant le même type de photosynthèse que les végétaux supérieurs (Lindblad et al., 1998). Elles colonisent des milieux très divers : eau douce, eau de mer, eau saumâtre, et même en écosystème terrestre. Plusieurs d'entre elles peuvent fixer l'azote atmosphérique : ce sont les espèces à hétérocyste qui pullulent dans les étangs piscicoles riches en phosphate. Certaines sont toxiques. D'autres, qui sont utilisées comme engrais, aliment, source d'énergie ou de produits chimiques présentent un intérêt économique certain.

Comme les cyanobactéries se trouvent à la frontière du monde des végétaux et des bactéries, plusieurs définitions ont été attribuées à la spiruline. En référence, Richmond la décrit comme un microorganisme à filaments bleu-vert, mobiles, composés de cellules cylindriques disposées en trichomes hélicoïdaux. Ces filaments tournent autour de leur axe ; la spiruline n'a pas d'hétérocyste, . Spiruline destinée à la production de petites quantités de proies vivantes elle ne peut donc pas fixer l'azote libre. La forme hélicoïdale du trichome, observable uniquement en milieu liquide est caractéristique du genre, mais les paramètres de l'hélice (épaisseur, longueur) varient selon les espèces, et même chez une même espèce (Richmond, 1986). L'espèce mexicaine *Spirulina maxima* se caractérise par des trichomes de 7 à 9 μ de diamètre, de 70 à 80 μ de long, légèrement effilés aux extrémités, formant une spirale régulière de 3 à 8 tours et de 40 à 60 μ de diamètre. Les cellules constituant les trichomes mesurent 5 à 7 μ de long et ne rétrécissent pas au niveau des articulations.

L'espèce du Tchad *Spirulina platensis* se compose de trichomes atteignant 350 μ de long, de 5 à 11 μ de diamètre, un peu rétrécis au niveau des articulations. Les tours de spire ont un diamètre de 20 à 50 μ , diminuant légèrement vers les extrémités (Fox, 1999).

III.1 .1.Bases techniques de la production

L'environnement doit comprendre une température convenant à la plante, de la lumière fournissant l'énergie pour la photosynthèse, et de l'eau ; avec en plus, en algoculture, un certain mouvement de l'eau pour assurer une répartition moyenne de la lumière et des éléments nutritifs. Un équilibre acido-basique et un pH favorable à la plante doivent être maintenus.

Un rythme de récolte et d'ajout d'éléments nutritifs doit être établi et la culture doit se faire dans un système ou un bassin convenablement conçu (FOX, 1999).

III.1.2. Facteurs essentiels de la culture**III.1.2.1. Facteurs climatiques**

Les deux paramètres fondamentaux qui contribuent à constituer le climat sont les températures et la pluviométrie. Il ne faut pour autant pas négliger les vents dominants, par exemple le mistral en vallée du Rhône, qui peuvent avoir des conséquences importantes sur l'évaporation d'un bassin de culture, sur la température de l'eau ou la "pollution" de ce bassin par tous les débris et les poussières qu'il peut entraîner.

De même certains éléments comme les haies, la présence de barres rocheuses, de forêts, etc. peuvent entraîner des conséquences importantes sur le microclimat, conséquences qu'il sera bon d'évaluer avant l'implantation d'un bassin... comme d'un jardin potager (Jourdan, 1999).

III.1.2.1.1. Température

Les premiers repères concernant les températures sont à peu près les mêmes que pour l'homme, 37°C : température idéale pour pousser. Au-dessus, c'est trop chaud. En dessous, la vitesse de multiplication baisse avec la température. A 20°C la croissance est pratiquement stoppée. La température du milieu de culture doit donc se situer entre ces deux températures. Plus la "saison" est longue, plus la période de récolte est longue. Les climats continentaux ou d'altitude sont désavantagés. Le handicap d'un climat trop froid peut être compensé artificiellement, comme pour tous les végétaux. La construction de bassins sous serre peut être d'autant plus intéressante que cet abri constitue non seulement une protection contre le froid, l'évaporation, les insectes et les poussières mais aussi contre les pluies diluviennes, comme les orages, qui peuvent faire déborder les bassins et donc provoquer une perte, ou au moins une dilution du milieu de culture (Jourdan, 1999).

III.1.2.1.2. Pluviométrie

La conduite de bassins de culture nécessite un minimum de ressources en eau. Les eaux de pluie sont intéressantes car propres et neutres (pas de minéraux en solution). Sous les climats à faible pluviométrie, ou à saison sèche longue, il peut être nécessaire de prévoir une citerne pour stocker de l'eau de pluie et compenser ainsi l'évaporation des bassins. Là encore, il faut un "juste milieu". Les excès de précipitations devront être prévus en construisant des bassins plus profonds ou en les protégeant. Le manque d'eau est évidemment rédhibitoire. La carence en eau de pluie peut être compensée par l'utilisation d'eaux de provenances diverses, et plus ou moins "chargées" (rivière ou fleuve, nappe phréatique, eaux usées...). Il faudra alors tenir compte de la qualité de l'eau dans la mise au point, puis l'entretien du milieu de culture.

La présence d'une couverture translucide au-dessus des bassins pour éviter une dilution du milieu de culture est une bonne solution dans les régions à fortes précipitations (Jourdan, 1999).

III.1.2.2. Autres facteurs

III.1.2.2.1. Lumière

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

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

- * Agiter suffisamment la culture pour que les filaments individuels ne restent pas plus d'une demi-minute à la surface en plein soleil, mais plongent et remontent fréquemment. Les « roues à aubes » constituent les systèmes d'agitation les plus utilisés; le but est de remuer l'eau et non de créer un dénivellement comme on le croit généralement (FOX, 1999).

L'agitation Il est impératif d'agiter, au moins occasionnellement (2-4 fois par jour), une culture de spiruline. On favorise ainsi une dispersion homogène de la spiruline dans le liquide, et son exposition à la lumière. Une agitation trop violente endommage la spiruline (fragments visibles au microscope) et provoque l'apparition de mousse. Certaines pompes centrifuges, ainsi que les chutes d'eau avec éclaboussures, sont spécialement néfastes. Le module proposé assure l'agitation continue de la culture par une petite pompe électrique

Pour de petits volumes de culture (moins de 100 litres), une agitation continue par injection d'air peut être réalisée au moyen d'un petit compresseur pour aquarium. Cette dernière méthode est très pratique pour la conservation d'une culture de secours (Jourdan, 1999).

III.1.2.2.2. Salinité

Les limites de salinité et d'alcalinité permises, sont généralement assez larges, mais on se place souvent vers les minima, cela pour des raisons d'économie et de productivité, avec une salinité totale de 13 g/l ; lorsque le carbone est apporté par le bicarbonate, on doit travailler à forte alcalinité pour réduire le volume des purges (JOURDAN, 1999).

Le sel de cuisine iodé et fluoré peut convenir mais souvent il contient jusqu'à 2 % de magnésium insoluble. Par contre l'emploi d'un sel peu raffiné est recommandé à cause de sa teneur en oligo-éléments. Si le sel apporte trop de magnésium, il y aura floculation de sels minéraux insolubles, surtout à pH assez élevé, ce qui peut être très gênant pour une culture qu'on ensemence peu concentrée en spiruline : celle-ci est en effet facilement entraînée par les flocculants et tombe au fond sans que l'on puisse la récupérer (JOURDAN, 1999).

III.1. 2.2.3. pH

Pour aboutir à une bonne croissance de la spiruline, le milieu de culture doit présenter un degré d'alcalinité situé entre 8,5 et 10,5. plus de détail

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 10 : s'il est trop bas la culture risque de mal démarrer, avec formation de grumeaux ou précipitation de la spiruline au fond.

Par contre s'il doit servir d'appoint à une culture existante son pH peut être avantageusement voisin de 8, ce qui contribue à maintenir le pH de la culture suffisamment bas par apport de bicarbonate. C'est typiquement le cas des bassins en cours d'extension ("à géométrie variable" (Jourdan, 1999).

III.1.3. Bassins de culture

Pour une production familiale ou artisanale on peut se contenter de bassins de petite taille, sans agitation à roue à aube, sans chicane médiane. Il y a alors de nombreuses façons de construire un bassin adéquat, variables selon les conditions locales Jean-Paul Jourdan, 1999

Il existe plusieurs types des bassins parmi elles on a :

- Bassins à bâche plastique :

La bâche plastique doit avoir au minimum une épaisseur de 0,5 mm. Elle doit être de préférence de qualité alimentaire et résistante aux rayons ultraviolets (KASONGO, 2003).



Figure6 : Bassin en tissu polyamide enduit PVC, Ecopark, Madurai, Tamil Nadu (Inde), 18 m², 1998 (Jourdan, 1999).

- Bassins en dur

Le fond d'un bassin en ciment doit être construit sous forme d'une dalle en béton armé de 10 cm d'épaisseur minimum, de très bonne qualité, sur terrain bien compacté. Les bords du bassin peuvent être en briques, en parpaings ou en béton armé (KASONGO, 2003).



Figure7 : Bassin en dur, Tamil Nadu (Inde), 1 m², 1996 (Jourdan, 1999).

- Bassins en argile :

Creuser sur 20 cm et faire un talus bien tassé de 20 cm également, le tout en pente douce. Si le terrain n'est pas naturellement argileux, garnir la surface d'une couche d'argile humide de bonne qualité, de 3 à 5 cm d'épaisseur, bien tassée pour éviter les fissures. Garnir les rebords de tuiles ou briques cuites, ou de plastique pour éviter les fissurations lors des baisses de niveau.

La spiruline pousse remarquablement bien dans un bassin en argile, mais sa pureté bactériologique doit être surveillée de plus près (risques accrus de présence de microorganismes anaérobies au fond). L'étanchéité n'est pas complète, mais elle peut être améliorée avec un film plastique même très mince (KASONGO, 2003).

III.1.4 . Milieu de culture

La spiruline pousse dans une eau à la fois salée et alcaline. L'eau utilisée pour le milieu de culture doit être de préférence potable (toutefois sans excès de chlore à défaut de tuer les algues) ou au moins filtrée, le plus important étant l'élimination des algues étrangères. Une eau dure produira des boues minérales (plus ou moins abondantes selon la teneur en calcium, magnésium et fer), qui décantent rapidement et n'encombrent pas particulièrement la culture, à condition que l'ensemencement initial en spirulines soit assez concentré.

La composition des milieux de culture peut varier énormément, selon la disponibilité des produits chimiques nécessaires à leur élaboration (JOURDAN, 1999). Le tableau VIII donne la composition chimique d'un milieu de culture typique (FOX, 1999).

Tableau XII : Analyse d'un milieu de culture typique

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

FOX (1999)

III.1.5. Ensemencement

III.1.5.1. choix de la souche

Il existe des spirulines de "races" (souches) différentes, bien qu'elles aient toutes des caractères communs qui les distinguent des autres algues. On reconnaît très vite au microscope ou même à la loupe de fort grossissement (25 fois) si les spirulines sont spiralées ou droites mais il est moins facile de dire de quelle souche, car les spirulines ont une forte tendance à changer de taille et de forme (spiralée plus ou moins serrée, ondulée ou droite). Un trop fort pourcentage de droites conduit à des difficultés de récolte.

Donc, il faut prendre de préférence une semence 100 % spiralée, de grande taille, d'un beau vert tirant vers le bleu-vert, filtrant facilement. Pour ensemençer il suffit de transvaser dans du milieu de culture neuf, un certain volume de culture provenant d'un autre bassin en production jusqu'à ce que la couleur devienne verte (JOURDAN, 1999).

III.1.5.2. Mesure de la concentration d'une culture de spiruline :

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

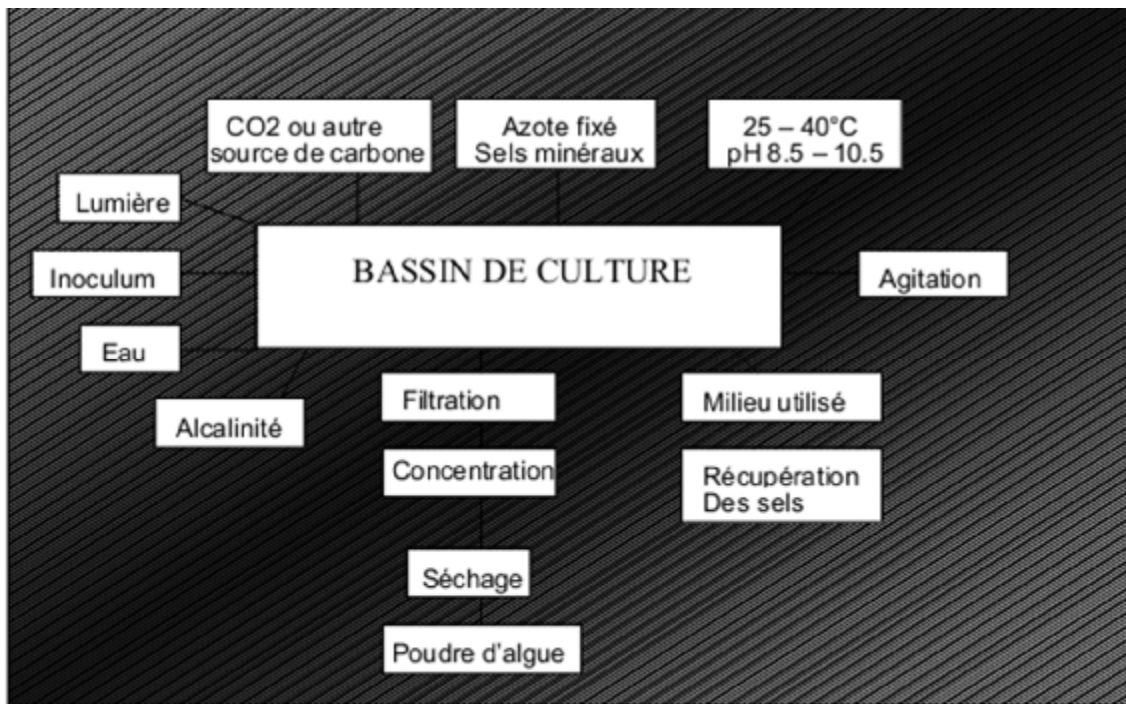


Figure 8 : Diagramme récapitulatif des paramètres de culture et de traitement de la spiruline (ELYAH, 2001 – 2003).

III.1.6. RECOLTE :

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 si le beau temps n'est pas assuré l'après-midi). La filtration sous plein soleil est fortement déconseillée car la biomasse sur les bords du filtre devient rapidement brune et salit la toile de filtration. Par temps couvert cette obligation de récolte tôt le matin est évidemment moins impérieuse, et par beau temps on peut toujours ombrer le filtre. Quelque soit le temps, si l'on opère en plein air, il faut couvrir le filtre pour éviter que la biomasse récoltée ne se salisse. Quand cela est possible il est très avantageux d'aménager un poste de récolte à l'abri du soleil et des poussières, de préférence dans un bâtiment (Jourdan, 1999).



Figure 9 : Récolte de Spiruline en salle après pré-concentration (A) et récolte directe sur le bassin de culture (B) (TSARAHEVITRA, 2005).

III.1.7. SECHAGE :

Le séchage est le seul moyen sûr de conserver et de distribuer la spiruline sans chaîne de froid. 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) ; attention à ne pas congeler et à éviter les retombées de gouttes d'eau condensée sur la biomasse en cours de stockage. En chambre froide à 1°C la biomasse peut se conserver jusqu'à une semaine. La biomasse lavée ne peut se conserver, même au réfrigérateur (Jourdan, 1999) .



Figure 10 : Extrusion de biomasse pressée, avec pistolet à silicone Sika, sur un plateau de séchoir électrique 1998(Jourdan, 1999) .

III.2. Domaines d'utilisation

La très grande richesse de la composition chimique de la Spiruline lui confère un large potentiel d'utilisations. Outre dans le domaine de la malnutrition, elle est utilisée dans des domaines variés. Elle est vendue dans les parapharmacies et les magasins de produits biologiques pour : équilibrer une alimentation par ses apports en micro-nutriments ; réguler les surcharges pondérales par sa richesse en protéines et phénylalanine ; améliorer les capacités sportives par ses teneurs en fer, vitamine B12 et β -carotène ; lutter contre l'asthénie par son apport en oligoéléments et vitamines ; freiner le vieillissement cellulaire par les propriétés antioxydantes du β -carotène, de la phycocyanine et de la vitamine E ; diminuer le cholestérol grâce aux acides gras polyinsaturés et à la vitamine E. Des études ont été faites sur son action anti-inflammatoire, dans la prévention de l'athérosclérose, sur la diminution du diabète. Elle est utilisée en aquariophilie et en aquaculture pour favoriser la croissance des poissons et des crevettes, renforcer les défenses immunitaires des poissons d'élevage, améliorer la fertilité et stimuler la coloration des poissons d'ornement tels le *Xiphophorus helleri* . Dans l'industrie agroalimentaire, elle est vendue pour la nutrition des animaux (chats, chiens, chevaux, vaches et taureaux) mais aussi dans l'alimentation humaine comme colorant naturel (chewinggums, sorbets, sucreries, produits laitiers, boissons). La phycocyanine est un des rares pigments naturels de couleur bleue. En cosmétologie, elle est utilisée dans les masques cryogéniques et crèmes anti-âge, par son action sur le renouvellement cellulaire. Dans le cadre du programme MELISSA, l'agence spatiale

européenne s'est intéressée à la Spiruline qu'elle intégrerait dans un écosystème artificiel fermé dans le compartiment photoautotrophe, d'une part pour équilibrer la ration alimentaire, d'autre part pour régénérer l'atmosphère par photosynthèse (Loïc *et al*, 2003).

III.2.1 . Utilisations sanitaires de la spiruline

Des essais précliniques récents ont démontré ses propriétés thérapeutiques, notamment, immunologique, hypocholestérolémiant, antivirale et antimutagène (ANONYME, 2007) .

Le but de cette partie du document est de s'intéresser aux bienfaits pour la santé que peut apporter une cure ou une prise régulière de spiruline.

A ce titre, des études scientifiques ont démontré les effets sur le système immunitaire, le cancer, le virus du sida, le virus de l'herpes (ANONYME, 2007) .

III.2.1.1. Cholestérolémie

Parmi les 1ères causes de mortalité en Occident, les maladies cardio-vasculaires proviennent d'une alimentation trop riche en sucre, en sel, du stress, de l'alcool, du tabac et du manque d'exercice. Après 40 ans, le cholestérol en excès se dépose dans les artères (athérosclérose) puis les vaisseaux se durcissent (artériosclérose). Certains aliments jouent un rôle protecteur comme l'ail, le yaourt, les céréales complètes, la pectine de fruits, les poissons gras.

La spiruline avec son fort taux de gamma linoléique permet d'abaisser le taux de cholestérol de 4,5% dont 6% de mauvais cholestérol avec une prise quotidienne de 4g pendant 8 semaines.

La société DainipponInk&Chemicals estime que cette réduction est due aux facteurs suivants : forte teneur en chlorophylle (1,1g pour 100g), acides gras poly-insaturés gamma linoléique (1g pour 100g), fibres (8g pour 100g), acide nicotinique, rapport très bas entre lysine et arginine (0,67) (ANONYME, 2007).

III.2.1.2. Cancer

2nde cause de mortalité en Occident, on estime que le tabac est responsable de 35% des mortalités par cancer et que la surnutrition en graisses est la cause de 60% des cancers chez la femme et 40% chez l'homme. Aussi il est recommandé de consommer peu de viandes animales, charcuterie, fromage, mais au contraire des céréales complètes, des légumineuses, des fruits et des légumes frais, principalement ceux ayant des feuilles d'un vert soutenu ou une chair jaune, autrement dit ceux qui sont riches en bêta-carotène. L'effet protecteur du bêta-carotène sur les cancers du poumon, de la gorge, de l'estomac, du côlon, du sein et de

l'utérus a été largement démontré par de très nombreuses études. Il est également démontré qu'outre l'effet cancérigène direct du tabac, celui-ci inhibe également partiellement l'utilisation du bêta-carotène. De nombreuses expériences sur la spiruline ont été conduites dans ce domaine.

A l'école de médecine dentaire d'Harvard, des applications de bêta-carotène sur les cancers de la bouche de hamsters ont permis de réduire voire faire disparaître les cancers. D'autres expériences ont permis de démontrer que des hamsters nourris avec de la bêta-carotène provenant de la spiruline et exposés à des substances cancérigènes ne développaient pas de cancer, alors qu'un autre groupe ne recevant pas de bêta-carotène développait le cancer.

Une étude japonaise a également mis en évidence l'effet protecteur de la phycocyanine (15% du poids). Des souris atteintes d'un cancer du foie ont vu leur survie augmenter significativement par rapport au groupe témoin. Une augmentation lymphocytaire a également été constatée. Cet effet est intéressant pour les personnes qui subissent des radiothérapies et des chimiothérapies. 3g de spiruline par jour freine les pertes de leucocytes, réduit les nausées et la fatigue générale.

Des expériences au Japon sur des rats, montrent que la spiruline réduit la toxicité pour les reins de certains médicaments lourds, comme ceux utilisés en chimiothérapie (ANONYME, 2007).

III.2.1.3. Anémie

Due à une diminution de la concentration en hémoglobine du sang, elle peut être liée à un manque de fer, carence la plus répandue dans le monde, problème majeur de santé publique. Les enfants, les femmes et les personnes âgées sont les plus touchés. Le fer constitue le cœur de la molécule d'hémoglobine, assurant le transport du dioxygène aux cellules par les globules rouges. La spiruline contient plus de fer que tout autre aliment, et est 3 fois plus assimilable que celui contenu dans les légumes et la viande.

A l'université de Tokyo, une étude a démontré qu'en donnant 4g de spiruline par jour pendant 30 jours à des femmes anémiées suite à des cures d'amaigrissement, le sang avait récupéré 21% d'hémoglobine en plus (ANONYME, 2007).

III.2.1.4. Néphrites

A l'université de Cuba, l'administration de spiruline à des rats (30% de leur ration alimentaire) ayant reçus un dérivé du mercure, un antalgique, un antibiotique et un anti-cancer, a mis en évidence une diminution importante de l'urée, de la créatinine et l'amélioration physiologique de leurs reins (ANONYME, 2007).

III.2.1.5. La spiruline contre le VIH :

D'après l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) il y a dans le monde en voie de développement 6 millions de personnes infectées par le virus du SIDA qui pour survivre ont besoin de la thérapie anti-rétrovirale hautement active (HAART). Or seulement 400 000 d'entre elles y ont accès. Après de nombreuses années d'indifférence à cette pandémie, les compagnies pharmaceutiques commencent seulement à proposer ces anti-rétroviraux à des prix convenables. L'OMS s'efforcera de fournir la thérapie anti-rétrovirale à 3 millions de personnes pour l'année 2005. Néanmoins 5 millions de personnes ont été récemment infectées par le SIDA et 3 millions d'entre elles meurent chaque année. Cette sinistre réalité appelle à la mise en œuvre de tous les moyens possibles pour combattre la pandémie.

Le rôle des aliments et des compléments alimentaires comme stratégie naturelle thérapeutique dans la prévention et l'atténuation du SIDA a été très peu étudié. Cette communication met en évidence le rôle de la Spiruline (*Arthrospira*) dans la prévention, l'atténuation, la diminution de la progression de la maladie et toute amélioration de la qualité de vie des personnes affectées par le virus du SIDA (Loïc, 2004).

La spiruline de part sa teneur en protéines, provitamines A et oligoéléments constitue un soutien nutritionnel non négligeable pour les PvVIH (Nikiéma *et al*, 2009).

Le rôle des aliments et des compléments alimentaires comme stratégie naturelle thérapeutique dans la prévention et l'atténuation du SIDA a été très peu étudié. Cette communication met en évidence le rôle de la Spiruline (*Arthrospira*) dans la prévention, l'atténuation, la diminution de la progression de la maladie et toute amélioration de la qualité de vie des personnes affectées par le virus du SIDA.

Il apparaît dans la littérature que la Spiruline régule favorablement le système immunitaire en augmentant l'activation macrophage, l'activité des cellules T et l'activité des cellules naturellement destructrices. Il a aussi été démontré que la Spiruline augmente la production de gamma interféron, ce qui peut éventuellement rendre les virus inactifs, que l'eau extraite de la Spiruline avait une activité antivirale contre notamment le virus humain immunodéficient (I-HIV-I) et que le virus simplex de l'herpes (BSV-1). Les polysaccharides sulfatés poly anioniques de la Spiruline sont aussi des candidats potentiels aux microbicides anti-HfV. ÎLE (LOIC., NARDO, 2004).

III.2.1.6. Effets contre l'hyperlipidémie

Le premier rapport sur la réduction du cholestérol sanguin par la Spiruline a été réalisé sur des rats par Devi et Venkataraman en 1983. Depuis, plusieurs chercheurs ont

confirmé ces hypothèses par des expérimentations sur l'homme. En 1984, Kato et al. ont démontré que le taux de cholestérol diminuait lorsque l'alimentation était complétée de 16% par de la Spiruline. Dans une étude réalisée sur des rats en 1987, Iwata et al. ont montré qu'une alimentation enrichie à 5, 10 et 15% de Spiruline engendrait une diminution significative du cholestérol total, des triglycérides et des phospholipides. Sur les essais réalisés sur l'homme, on a remarqué qu'un régime régulier à la Spiruline de 4,2 g / jour pendant 4 semaines engendrait une diminution du cholestérol et une baisse significative de dépôts graisseux dans les artères. Cependant, si l'administration de Spiruline est discontinuée, le taux de cholestérol reprend sa valeur de départ.

Ce phénomène serait dû à l'augmentation de l'activité d'une enzyme, la lipoprotéine lipase, enzyme clé dans le métabolisme des triglycérides et des lipoprotéines (Belay *et al*, 1993).

III.2.1.7. Effets protecteurs contre les radiations

D'après Schwartz et al. , les molécules protectrices présentes dans l'extrait de Spiruline agissent comme facteurs stabilisants de l'ADN. On observe alors une diminution des micronucléus induits par les rayons γ . Des expériences conduites sur des enfants victimes de Tchernobyl auxquelles on a administré de la Spiruline pendant 45 jours, ont montré une augmentation des cellules-T suppresses et d'hormones. La radioactivité de leurs urines a diminué de 83% (Belay *et al*, 1993).

III.2.1.8. Effets contre la toxicité des reins

D'après Yamane et al. en 1988, les rats ayant une forte teneur en mercure montrent des urines riches en azote et un serum riche en créatinine, indicateurs d'une infection des reins.

L'ajout de 30% de Spiruline dans le régime alimentaire fait diminuer les taux de ces indicateurs, par l'intermédiaire de la diminution de l'activité de certaines enzymes (alcaline phosphatase et glutamic-oxalo-acétate transaminase). Il est suggéré que la phycocyanine serait responsable de cette diminution d'activité et donc de la détoxification des reins (Belay *et al*, 1993).

III.2.1.9. Effets sur la flore intestinale

Tsuchihashi a montré en 1987 que l'ajout de 5% de Spiruline dans l'alimentation augmentait de 3 fois la population des Lactobacillus des intestins de rats. Chez les humains, les Lactobacillus sont connus pour leurs 3 fonctions majeures : ils facilitent la digestion et

l'absorption des nutriments, protègent contre les infections et stimulent le système immunitaire. Chez les malades du SIDA, une mauvaise absorption des aliments associée à un terrain opportun aux infections ne font qu'augmenter l'expression des symptômes de la maladie. C'est pourquoi un complément en Spiruline est recommandé pour maintenir la population de *Lactobacillus* et ainsi ralentir la progression du virus (Belay *et al*, 1993).

III.2.1.10. Effets contre le diabète, l'obésité et l'hypertension

A l'université de Tokyo, la prise de 5g par jour a mis en évidence une amélioration et un meilleur contrôle du diabète (ANONYME,2007).

D'après Takaï et al (1991), la fraction soluble dans l'eau de la Spiruline a la propriété de diminuer l et aux de glucose dans les érum .Parailleurs, Becker et al. ont montré en 1986 qu'un complément en Spiruline de 2,8 g / 3 fois / jour pendant 4 semaines entraînait une réduction du poids corporel chez les obèses. Iwata et al. (1990) ont remarqué une suppression de l'hypertension chez les rats, suite à un apport de Spiruline (Belay *et al*, 1993).

Tableau XIII: Tests cliniques qui présenter l'effet de la spiruline sur autre maladies

La maladie	Diagnostic clinique
Allergies, Asthme	Tests cliniques indiquant une amélioration importante. complément d'information de la spiruline
Pancréatite	Tests cliniques indiquant un effet favorable. complément d'information de la spiruline
Cataracte	Tests cliniques indiquant un retour à la vision. complément d'information de la spiruline
Ulcères à l'estomac dus au stress	Expériences sur des rats montrant une efficacité préventive et curative. complément d'information de la spiruline

(ANONYME,2007)

III.2.1.11. Spiruline et femmes

Les maladies de la femme, bénignes ou dramatiques, tel que l'indisposition menstruelle, le cancer du sein ou de l'utérus en passant par les risques d'anémie... sont dues majoritairement à un déséquilibre hormonal, par carence d'acides gras essentiels et à une diminution du taux de fer. La spiruline en cure régulière présente un intérêt dans les deux

domaines. Pour les femmes enceintes et celles qui allaitent, la prise régulière de spiruline est également recommandée (GUSTAVSON et *al*, 2000).

III.2.1.12. Spiruline et régime

Par sa richesse et son équilibre, la spiruline est employée lors de régimes amaigrissants pour éviter les carences. C'est une des plus grandes sources de phénylalanine, un coupe faim très en vogue ces dernières années (GUSTAVSON et *al*, 2000).

III.2.1.13. Spiruline et végétarisme

La spiruline est l'alliée idéale des végétariens en tant que source de vitamine B12, unique dans le règne végétal, et de fer. L'absence de ces deux ingrédients compromet parfois la vitalité des végétariens. La spiruline est d'un apport protéique important. Dans le cadre d'un régime végétalien strict, elle fournit la lysine et la méthionine, 2 acides aminés essentiels absents dans les protéines végétales (GUSTAVSON et *al*, 2000).

III.2.1.14. Spiruline et les sportifs (L'augmentation de la VO2 max)

De nombreux sportifs de haut niveau utilisent la spiruline pour améliorer leurs performances, sous le suivi de médecins et de préparateurs physiques. Les équipes olympiques cubaine et chinoise l'utilisent au cours de leur préparation (GUSTAVSON et *al*, 2000).

La structure chimique intime de la phycocyanine, ce pigment bleu « cyan » spécifique de la spiruline, est quasi identique à celle de l'érythropoïétine, le cœur du globule rouge. D'où la capacité exceptionnelle liée à la récupération lors des efforts en aérobie.

VO2 max Il existe une relation directe entre l'activité physique d'un individu et sa consommation en oxygène, dite « VO2 ». Le sportif de compétition est soumis régulièrement à des tests d'effort au cours desquels sont mesurées ses concentrations en oxygène et en dioxyde de carbone dans l'air expiré, afin de déterminer notamment la consommation maximale d'oxygène que son métabolisme peut atteindre. Ce débit maximal d'oxygène est appelé « VO2 max », et constitue la limite théorique que l'organisme ne peut atteindre, voire dépasser, sans risques. L'entraîneur va, par exemple, demander à son poulain de travailler à 80 % de sa VO2 max.

Ce débit maximal dépend de plusieurs facteurs :

- un facteur génétique, immuable ;

- des facteurs intrinsèques qui, eux, peuvent s'améliorer par le biais d'un entraînement spécifique bien conduit, ainsi que par des apports micro-nutritionnels pertinents...notamment ceux, très complets, contenus dans la spiruline (DENIS, 2011).

III.2.2. *Spirulina platensis* et l'industrie pharmaceutique

L'industrie pharmaceutique, toujours en quête de nouvelles molécules, a été l'une des pionnières à observer la nature, à l'utiliser et à la copier. Plus de 60% des anticancéreux et 70% des antibiotiques utilisés aujourd'hui dérivent de produits naturels. Aujourd'hui la recherche de nouvelles molécules apportant un réel bénéfice thérapeutique est de plus en plus difficile et coûteuse.

Les grands laboratoires pharmaceutiques ont besoin de trouver des molécules innovantes qu'ils pourront protéger par des brevets pendant plusieurs années et sur lesquelles ils pourront avoir un retour sur investissement rapide et de longue durée. C'est pourquoi, la tendance est aux médicaments biotechnologiques ou nano technologiques dérivés de la biologie moléculaire permettant le développement de molécules à action ciblée pour une réelle avancée thérapeutique.

La spiruline en tant que telle n'intéressera pas les industries pharmaceutiques car, malgré ses propriétés démontrées comme anti-inflammatoire, elle n'apporte pas de réelle avancée thérapeutique et ses effets sont surtout préventifs et non curatifs. Néanmoins, l'étude du mode *Spirulina platensis* et ses constituants : intérêts nutritionnels et activités thérapeutiques (Sébastien, 2008).

III.2.3. *Spirulina platensis* et l'industrie cosmétique

On entend par "cosmétique" tout produit destiné à être mis en contact avec les parties superficielles du corps humain (épiderme, systèmes pileux et capillaire, ongles, lèvres, organes génitaux externes, dents), en vue de les nettoyer, de les parfumer, d'en modifier l'aspect, de les protéger, de les maintenir en bon état ou de corriger les odeurs corporelles. (Code de la Santé publique, article L.5131-1). Peu de produits à base de spiruline et à visée cosmétique existent actuellement sur le marché. Seules quelques crèmes à base d'algue spiruline existent mais leur démonstration d'efficacité n'est basée que sur les publications scientifiques étudiées ultérieurement à savoir sur les propriétés de la spiruline utilisée par voie orale. A l'heure actuelle, aucune étude n'a été réalisée pour mesurer la biodisponibilité par la peau des molécules actives de la spiruline. Néanmoins, comme pour tous les produits cosmétiques, avant d'être proposés au consommateur, ils doivent faire l'objet d'un "dossier",

dossier qui est en permanence tenu à la disposition des Autorités Sanitaires, notamment de l'Agence Française de Sécurité Sanitaire des Produits de Santé (AFSSaPS) et du Service de la Répression des Fraudes (DGCCRF). Par ce dossier, l'industriel qui souhaite commercialiser un produit cosmétique assure qu'il a vérifié que *Spirulina platensis* et ses constituants : intérêts nutritionnels et activités thérapeutiques (Sébastien, 2008).

La spiruline contribue à ralentir le vieillissement de la peau grâce à ses molécules anti-oxydantes (acide gamma-linoléniques, phycocyanine, tocophérol, carotène, sélénium et zinc) qui empêchent la formation de radicaux libres. De plus, les acides gamma-linoléniques apportent souplesse, élasticité, et donc douceur à l'épiderme.

D'autre part, la spiruline concentre également tous les nutriments et oligo-éléments nécessaire à la brillance et à la résistance des cheveux et des ongles, ainsi que de nombreuses vitamines qui permettent de retrouver fraîcheur et santé (FALQUET, 2006).

III.2.4. *Spirulina platensis* et l'industrie alimentaire

Depuis près de 10 ans, la spiruline a déjà été référencée dans de nombreux produits et formes galéniques différents (comprimés, gélules, poudre...). Parfois appelés à défaut « cosmétique par voie orale », ces produits vantent les mérites de l'algue aux milles vertus sans pour autant avoir fait l'objet d'études scientifiques. Comme pour les cosmétiques, les industriels se fondent sur les nombreuses études dont la spiruline a fait l'objet. Cependant, comme illustré dans les paragraphes précédents, la spiruline et ses constituants ont réellement été testées *in vivo*, la transposition d'activité est donc possible, seule reste à démontrer que la dose active pour l'effet escompté a été atteinte.

Aujourd'hui, la quasi-totalité des compléments alimentaires à base de spiruline sur le marché ont comme indication de traiter la fatigue ou d'apporter une supplémentation protéique.

Ces indications utilisent seulement les propriétés nutritionnelles de l'algue à savoir sa composition riche en protéines et en vitamines (Sébastien, 2008) (La spiruline est l'un des végétaux connus les plus riches en protéines (60-70%). , 15 g de spiruline contiennent autant de protéines que 100 g de viande.) (Mahamat, 2003). Aucun ne fait part des propriétés thérapeutiques.

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

Dans le décret 2006-352, publié au Journal Officiel de la République Française le 20 mars 2006 : «on entend par complément alimentaire, les denrées alimentaires dont le but est

de compléter le régime alimentaire normal et qui constituent une source concentrée de nutriments ou d'autres substances ayant un effet nutritionnel ou physiologique seuls ou combinés, commercialisés sous forme de doses destinées à être prises en unités mesurées de faible Spirulinaplatensis et ses constituants : intérêts nutritionnels et activités thérapeutiques (Sébastien, 2008).

III.2.4.1. Alimentation animale

La spiruline, notamment de second choix (grumeaux, balayures), peut se valoriser dans l'alimentation des animaux (poules pondeuses, poulets, vaches, chevaux de course, poissons, crustacés, larves de crevettes, etc.). Elle améliore leur santé, leur apparence, leur qualité ou leurs performances. Pour les poissons, elle peut être donnée en l'état, fraîche ou sèche ou, mieux, être incorporée aux granulés. Pour les poules, on peut ajouter jusqu'à 10 % de spiruline dans la ration.: la qualité des œufs est améliorée (jaune plus coloré) (Jourdan, 1999).

III.2.4.2. Alimentation humaine

La spiruline ne remplace pas les aliments caloriques tels que le manioc, le riz, le blé, la pomme de terre ou le maïs, mais c'est un ingrédient idéal de la sauce protéinée qui accompagne la "boule" africaine, par exemple, apportant non seulement ses protéines, mais de nombreux autres éléments très favorables à la bonne santé de tous et notamment des petits enfants.

Mille mélanges et recettes peuvent être inventés pour consommer la spiruline crue ou cuite, fraîche ou sèche, de manière agréable. Il n'est pas exagéré de prétendre pouvoir faire de la très bonne gastronomie à base de spiruline de qualité, surtout fraîche.

La spiruline séchée en spaghetti est généralement préférée par les consommateurs au produit industriel séché à l'atomiseur ("spray drier"), tant pour sa consistance physique que pour son odeur. La présentation sous forme de spaghetti non ou peu broyés plaît généralement beaucoup, mais n'est pas pratique pour l'emballage et le stockage (Jourdan, 1999).

III.2.4.3.Cuisiner la spiruline

La spiruline, souvent rencontrée sous forme de poudre déshydratée, s'ajoute à l'alimentation habituelle. Ajoutée à un jus d'orange, elle se saupoudre sur la salade, se mélange au yaourt, confiture ou miel, s'accommode dans les sauces vinaigrettes, dans le guacamole ou tout simplement sur les plats après cuisson. Chacun peut cuisiner la spiruline à son goût, pourvu qu'elle ne soit pas cuite ce qui lui ferait perdre de sa vitalité (enzymes et vitamines thermosensibles) (GUSTAVSON *et al*, 2000).

III.2.4.4.Malnutrition

Faim, famine ou malnutrition? Il est indispensable de distinguer chaque terme. La faim se caractérise par un manque d'apport calorique mais pas nécessairement par un manque de qualité de nourriture. La famine est liée à un manque quantitatif de nourriture à grande échelle pendant une période assez longue. Alors que la malnutrition est essentiellement due à la faible valeur qualitative des aliments absorbés n'apportant pas tous les éléments nécessaires à la santé (sucres, lipides, protéines, acides gras essentiels, vitamines, minéraux, ..) (ANONYME, 2007).

la malnutrition entraîne chez le jeune enfant de nombreuses conséquences néfastes : augmentation du risque de mortalité, diminution des défenses immunitaires, retard du développement moteur, diminution des capacités cognitives et d'apprentissage à l'école (Christophe., Denis, 2011).

Dans les pays dits développés, la malnutrition est tout aussi possible par des apports excessifs ou déséquilibrés de certains nutriments.

Selon les Nations Unies, 250 millions d'enfants sont malnutris, et 74% de la mortalité des enfants de moins de 5 ans est due à la malnutrition. Par ailleurs il est intéressant de relever que la malnutrition légère ou modérée conduit au $\frac{3}{4}$ des décès, ce qui conduit les chercheurs de l'université de Cornell aux USA à dire que les programmes nutritionnels doivent s'intéresser prioritairement à cette population, sujette à de nombreuses maladies et infections, à des retards de croissance et du développement mental.

200 millions d'enfants ont un déficit pondéral, 230 millions ont un retard de croissance, 50 millions sont émaciés. La carence en vitamine A est un grave problème de santé publique dans plus de 60 pays. 30% de la population mondiale est carencée en iode, 2 milliards de personnes sont carencées en fer. Au Brésil, 20% des enfants sont malnutris, la moitié des femmes souffrent de carences alimentaires, en Suisse 14% de la population souffre de carences nutritionnelles, pour 8% des enfants et adolescents en France. Aux USA, 1 enfant sur 3 souffre de malnutrition (ANONYME, 2007).

L'essentiel des carences graves proviennent du manque de vitamine A, du fer et de l'iode. La spiruline est une bonne réponse à ces carences, 2 à 4g suffisent à couvrir les besoins quotidiens en zinc, fer, vitamine A et acides gras essentiels chez l'enfant.

De la naissance à l'âge de 4 mois, ces besoins sont couverts par le lait maternel, au delà une alimentation complémentaire est rendue nécessaire pour apporter les nutriments énergétiques (sucres ou glucides, matières grasses ou lipides), les nutriments bâtisseurs (protéines), et les nutriments protecteurs (vitamines et minéraux).

Tous ces nutriments doivent être apportés simultanément pour garantir leur efficacité. Diverses organisations ont fait le choix d'intervenir dans la prévention de la malnutrition infantile.

Cette prévention est notamment basée sur l'éducation nutritionnelle des populations, le développement et la consommation de produits cultivables localement et la mise à disposition d'aliments de complément (Christophe., Denis, 2011).

La FAO constate que peu de pays, ayant des ressources insuffisantes par rapport à leurs besoins alimentaires, peuvent satisfaire leurs besoins par des récoltes de nature conventionnelle (Goupille, 1985). Cette situation a fait germer l'idée de se tourner vers des sources alimentaires non conventionnelles comme les algues et plus précisément les micro algues (Jourdan, 1999).

Sur la base de sa composition en micronutriments, de son potentiel pour la santé et du fait qu'elle soit cultivable localement, la spiruline présente des avantages majeurs dans la lutte contre la malnutrition chronique (Christophe., Denis, 2011).

. Si pour ça , elle est présentée comme un élément original et intéressant pour répondre aux besoins de la malnutrition dans les pays en voie de développement (PED). (Bensalem, 2008) , Toutefois, malgré l'accumulation de preuves, son utilisation dans de nombreux centres nutritionnels et les progrès technologiques importants dans sa production dans les pays en développement, la spiruline n'est pas soutenue par les agences intergouvernementales (Christophe., Denis, 2011).



Figure 11 : Photo d'un enfant dénutri ayant été traité avec 10g/j de spiruline pendant 3 mois (Jourdan, 1999).

III.2.5. Principales utilisations :

C'est en 1940 que DANGEARD mentionne pour la première fois l'utilisation des spirulines dans l'alimentation humaine . Il apportait ainsi l'expérience de CREACH, pharmacien des troupes coloniales françaises, qui en 1939, s'était intéressé aux galettes séchées vendues sur les marchés de Massakong à 50 kilomètres du lac Tchad. Ce n'est que plus tard à la suite des résultats de non toxicité des analyses bactériologiques que des tentatives de consommation humaine ont été réalisées dans un hôpital parisien. Par ailleurs des essais avec des bébés dénutris à l'hôpital de Mexico ont donnés de bons résultats .

Au Zaïre, BUCAILLE réalise une expérimentation thérapeutique de réhabilitation nutritionnelle avec de la spiruline chez des enfants atteints de malnutrition protéinoénergétique avec un régime comportant en moyenne 10gr de spiruline pendant deux à trois semaines ; il obtient de très bons résultats.

Un autre essai clinique avec des résultats satisfaisants a été mené au Centre Nutritionnel de Bangui en République Centrafricaine par PICARD au cours duquel les enfants ont reçu 10 gr de spiruline mélangée de sardines, de légumes, de feuilles de manioc et de fruits écrasés.

A Dakar, l'expérimentation de la spiruline dans deux centres de récupération nutritionnelle sur une période de 30 jours a permis d'obtenir un taux de 88,14 % de succès avec un gain pondéral moyen de 50 grammes par jour .Ces travaux démontrent l'intérêt de la spiruline dans le traitement de la malnutrition.

En plus de cet usage alimentaire, la tradition thérapeutique africaine a recours à la consommation de spiruline pour lutter contre certains troubles intestinaux ; pour faciliter l'accouchement ; comme cataplasme contre les oreillons et l'enflure de jambe.

La spiruline est également utilisée comme cicatrisant et comme hypotenseur parce qu'elle contient de l'acide Gamma-linoléique qui par ailleurs présente un intérêt dans la prise en charge de l'hypercholestérolémie.

En effet, NAKAYA a réalisé une étude sur 30 hommes volontaires présentant une hypercholestérolémie sévère associée à une HTA de degré modéré. Ils ont reçu 4,5 gr de spiruline par jour pendant 8 semaines sans modifier leur régime alimentaire habituel. Le taux de cholestérol diminua de 4,5 %, le taux de LDL baissa de 6,1 %, sans perte pondérale. Enfin des recherches au Japon ont montré qu'une consommation régulière de spiruline chez le rat induisait une prolifération de lactobacilles au niveau du caecum trois fois plus abondante que chez le groupe témoin, d'où un moindre risque de survenue de diarrhée (Jourdan, 1999).

CHAPITRE IV

***Techniques d'extraction et de dosage
de différentes fractions biochimiques
de la spiruline***

Conclusion générale

Les spirulines(*Arthrospira platensis*), sont des cyanobactéries qui ont une composition chimique riche en différentes constituantes, parmi ces derniers le composant majeur est les protéines, les lipides ,les glucides, ainsi que les vitamines et les minéraux.....etc.

Cette composition donne à la spiruline(*Arthrospira platensis*), un statut très important qui sera impliqué dans le monde car sa richesse alimentaire, donc cette dernière fais partie d'un indicateur de développement mondiale dans des plusieurs domaines, dans ce but les pays d'Afrique font une vaste culture impliquée surtout au Tchad, Cote d'Ivoire, Borkina Faso...etc. pour la lutte contre la malnutrition et aussi pour l'amélioration des produits énergétiques.

De même la spiruline(*Arthrospira platensis*), est un complément alimentaire ; plusieurs chercheurs font des expériences sur son effet thérapeutique et sanitaire ils ont trouvé que son intérêt touche plusieurs domaines de vie.

Ce travail se base sur l'étude des fractions biochimiques et montre la valeur et l'intérêt fonctionnel des constituantes essentielles de la spiruline(*Arthrospira platensis*) qui est actuellement l'aliment de santé, car son utilisation pharmaceutique aux différents produits surtout les produits énergétiques qui assurent le mouvement physique surtout pour les sportifs, et aussi pour faire une dégradation de la famine aux pays pauvres.

Ce travail a visé à la sensibilisation de la société à l'intérêt de la culture et l'utilisation de la spiruline et son intégration dans notre régime alimentaire, Ce travail constitue aussi une initiation à l'introduction de la spiruline dans cette région saharienne et d'autres études pratiques seront nécessaires à la maîtrise de sa culture.

VI.1.Méthodes de dosage**VI.1.1.Dosage des protéines de la spiruline**

En utilisant la méthode de dosage Bradford suivant laquelle un complexe coloré est obtenu (réactif Bradford – protéine), les résultats indiquent que la spiruline étudiée est composée de 8 à 20 mg de protéines par gramme de matière sèche. Seulement cette quantité mesurée est inférieure à celle attendue théoriquement, puisque la spiruline est constituée d'environ 65% de protéines (650 mg). Ceci est principalement dû à deux raisons essentielles; à savoir:

- Le choix de la protéine référence utilisée qui est celle du jaune d'œuf différente sur le plan structural de celle de la spiruline pour laquelle on préconise préférentiellement la protéine standard SBA (sérum d'albumine bovine),
- Les concentrations choisies pour réaliser la courbe d'étalonnage ne concordent pas avec les quantités attendues.

Quoiqu'il en soit, la technique utilisée reste valable pour doser approximativement les protéines présentes sans être précise sur le plan quantitatif. De ce fait, il apparaît qu'il serait plus judicieux de choisir des protéines plus spécifiques. Cas de la spiruline : Les protéines ont été quantifiées par spectrométrie utilisant la méthode de Bradford. Un volume de 50 mL de suspension algale est centrifugé à 3000 tr/min pendant 2 à 3 min. Les cellules (culot) sont lavées à l'eau distillée et centrifugées de nouveau.

Une fois les chlorophylles écartées après extraction avec de l'acétone à 90% v/v. Le culot obtenu après centrifugation Etude de l'impact de l'incorporation de la spiruline sur les propriétés nutritionnelles, technologiques et organoleptiques est mélangé avec 8 mL d'acétone, cette suspension est agitée vigoureusement puis placée à l'obscurité à 4°C pendant 48 h. Une centrifugation à 800 trs/min est réalisée; le surnageant obtenu renferme les chlorophylles, par contre le culot issu de cette centrifugation est additionné à 1 mL d'eau distillée et à 1,5 mL de réactif de Bradford. La densité optique à 595 nm est lue après un temps de réaction de 10 min aux fins de détermination du taux de protéines.

La courbe étalon est réalisée en préparant des concentrations connues de jaune d'œuf (DOUMANDJI *et al*, 2011).

VI.1.2.Dosage des lipides

La détermination des matières grasses est faite dans cette manipulation selon la méthode d'extraction par le SOXHLET en utilisant l'hexane comme solvant.

50 g d'échantillon sont placées dans le Soxhlet et y introduire 500 mL d'hexane dans le ballon, régler la température à 60 °C.

Par la suite, chasser la majeure partie du solvant à l'aide de l'évaporateur rotatif pour éviter l'ébullition de l'huile qui à la longue pourrait modifier les indices d'acidité.

Le ballon contenant les lipides est placé à l'étuve pendant 30 min à 103°C, puis au dessiccateur pendant 30 min. Le poids des lipides est obtenu par la différence entre le poids final et le poids initial du ballon.

Les résultats sont donnés par la formule suivante:

$$\text{Teneur en MG (\% MS)} = (A-B) \cdot 100 / C \cdot MS / 100$$

A: poids du ballon + extrait en gramme

B: poids du ballon vide en gramme

C: poids de la prise d'essai en gramme

MS: matière sèche en pourcentage (DOUMANDJI *et al* ,2011).

VI.1.3.Dosage des glucides

Cas de la spiruline (la méthode de Miron 2003) : La méthode utilisée pour déterminer le taux des carbohydrates est inspirée de celle de la réaction acide sulfurique + anthrone adaptée à la biomasse algale.

A 100 mg de biomasse sont ajoutés 8 ml d'acide perchlorique agité fortement et laissé Cinq mL du réactif à l'anthrone fraîchement préparé sont ajoutés à 1 mL du filtrat précédemment obtenu puis chauffés à 100°C pendant 12 minutes, une couleur verte se développe en raison de la formation d'un complexe glucose – anthrone, dont on détermine la densité optique à 630 nm après refroidissement du mélange.

Le blanc étant 5 mL du réactif additionné à 1 ml d'eau distillée. Une courbe étalon est réalisée en préparant des concentrations connues de D + glucose dissous dans de l'eau distillée. Densité optique et concentration en glucose (Cg; mg/mL) sont liés par la relation suivante:

$$Cg = 0,536 \times DO_{630} + 0,0028$$

Cg : concentration de glucose (mg/mL) (DOUMANDJI *et al* ,2011).

VI.1.4.Dosage de vitamine B12

la vitamine est la plus difficile à obtenir dans un régime sans viande car aucun végétal courant n'en contient.

La spiruline en serait quatre fois plus riche que le foie cru, longtemps donné comme meilleure source. Certains tests radiochimiques de liaison au facteur intrinsèque nieraient la présence de vitamine B12 "active" dans la spiruline (Leitzmann, 1993). Ces résultats seraient variables selon les souches de spiruline et cette même méthode d'analyse révélerait de hautes teneurs en B12 "active" dans certaines souches (Hau, 1995). Il semble maintenant que la méthode de choix pour le dosage de la vitamine B12 soit basée sur la chimiluminescence. En utilisant cette méthode, une souche particulière de spiruline (NIES-39) a été soigneusement étudiée en terme de contenu et d'identité des composés de la famille de la vitamine B12, les corrinoïdes (Watanabe, 1999, 2002). Il en résulte que le corrinoïde prédominant (83%) est une pseudo-B12, la 7-adeninyl cyanocobamide, mais que la véritable vitamine B12 représente tout de même 17% des corrinoïdes totaux. Le composé prédominant ne semble pas avoir d'activité B12 chez l'homme, mais il n'interfère pas dans le métabolisme normal de la vitamine B12 (Watanabe, 1999). Une note technique de la firme « Cyanotech » mentionne une teneur totale en corrinoïdes de 7 micro-gramme par gramme de spiruline et une fraction de 36% représentant la vitamine B12 assimilable par l'homme (Todd-Lorentz, 1999). Ces valeurs indiquent qu'un gramme de cette spiruline couvrirait plus de 80% des apports quotidiens en B12 pour un adulte.

VI.1.5.Dosage des chlorophylles et des caroténoïdes de la spiruline (la méthode de Hansmann, 1973)

La détermination de la teneur de ces pigments va permettre d'expliquer le changement de la couleur du produit fini La quantité des chlorophylles est mesurée par spectrophotométrie, 5 mg de poids sec de micro-algue sont centrifugés (800 tours pendant 2 min) puis mélangés à 8 mL d'acétone 90% (v/v) pour extraire tout les pigments.

La suspension est agitée vigoureusement puis mise à l'obscurité à 4°C. pendant 48 h. Un surnageant est obtenu après centrifugation (800 tr/min pendant 5 min). La densité optique de ce dernier est lue au spectrophotomètre (UV - Visible) à 665, 645 et 630 nm. La quantité des chlorophylles est calculée selon les équations suivantes:

$$[\text{cha}] = 11,6 \text{ DO } 665 - 1,31 \text{ DO } 645 - 0,14 \text{ DO } 630$$

$$[\text{chb}] = 20,7 \text{ DO } 645 - 4,34 \text{ DO } 665 - 4,42 \text{ DO } 630$$

$$[\text{chc}] = 55,0 \text{ DO } 630 - 4,64 \text{ DO } 665 - 16,3 \text{ DO } 645$$

Cha Chb et Chc sont les concentrations des chlorophylles a, b et c en mg/L.

Les caroténoïdes sont extraits en ajoutant des parts de 1 mL d'éthyle éther jusqu'à obtention d'un extrait clair. Le solvant est ensuite évaporé. Le culot obtenu est alors mis en suspension dans 5 mL d'acétone 90% (v/v) puis lu par spectrophotométrie à 444 nm. La concentration en caroténoïdes (Ct en mg/L) est donnée par l'équation suivante:

$$Ct = 4,23 \times DO_{444} - 0,0439 \text{ (DOUMANDJI } et al, 2011).$$

VI.2.Méthodes d'extraction

l'extraction est une méthode de production de la matière pure d'un composant, donc pour obtenir l'extrait de phycocyanine on fait la méthode suivante.

VI.2.1.La phycocyanine

C'est un des rares colorants alimentaires naturels de couleur bleue. Son usage est autorisé en Europe. Un extrait liquide de spiruline fraîche titrée en phycocyanine a été mis au point par la société Alpha Biotech (Jaouen et al 1999)

La phycocyanine extraite de la Spiruline est vendue sous le nom de « linablue » ou « sérum bleu » dans les industries alimentaires et cosmétiques à titre de colorant alimentaire, marqueur fluorescent, enzyme (Loïc et al, 2004).

VI.2.1.1.Méthodes d'extraction de la phycocyanine

a- Lyse cellulaire

La première étape consiste à dénaturer les cellules de spiruline afin de faciliter l'extraction des molécules incluses dans les thylacoïdes.

Une technique consiste en l'alternance de phases de congélation-décongélation suivi d'un traitement par sonication. Ces étapes vont fragiliser et rompre les membranes cellulaires et ainsi faciliter l'accès aux molécules présentes dans le cytoplasme et les organites intracellulaires.

Certains préfèrent ajouter une solution de tampon phosphate pH 6,8 durant l'étape de congélation-décongélation et au lieu d'utiliser la sonication, ils utilisent un *mixer* pour rompre les membranes cellulaires et ajoutent une étape d'extraction à l'acide chlorhydrique (concentration optimale 10N) avant d'effectuer la centrifugation.

La séparation et la concentration des différents constituants s'effectuent ensuite par une étape de centrifugation permettant de recueillir un surnageant de couleur bleu clair (Sébastien, 2008).

b- Séparation et purification

Plusieurs méthodes de séparation de phases existent. L'une d'entre elles consiste en différentes phases de fractionnement par précipitation avec une solution de sulfate d'ammonium à 30%, 50% et 60% (m/v). Les précipitats des solutions à 50% et 60% permettront d'isoler respectivement la C-phycocyanine et l'allophycocyanine qui seront par la suite solubilisées dans une solution de tampon phosphate (0,05 M pH 7) .

La séparation peut aussi s'effectuer par filtration sur colonne (exemple : colonne Bio-Gel avec des limites d'exclusion situées entre 1500 et 20000 Da) permettant de recueillir différentes fractions et d'isoler celle contenant les molécules de phycocyanine .

Ces fractions isolées subiront ensuite différentes étapes de purification par chromatographie sur colonnes (colonne DEAE-Sephadex puis Sephadex G-100) (colonne d'hydroxyapatite puis DEAE Sephadex A-50) (Sébastien, 2008).

Le degré de pureté de la phycocyanine obtenu est généralement évalué en utilisant le ratio d'absorbance A_{620/280} pour la phycocyanine et A_{655/280} pour l'allophycocyanine où l'absorbance à 620 nm et 655 nm correspond respectivement à l'absorbance maximale pour la phycocyanine et l'allophycocyanine et l'absorbance à 280 nm à celle des protéines totales. Ainsi au ratio de 0,7, la pureté est considérée de catégorie alimentaire, à 3,0 de catégorie réactif et supérieure à 4,0 de catégorie analytique (Sébastien, 2008).

VI.2.2.Le calcium

puisque le calcium est un composant essentielle de la spiruline et leur interet corporel majeur on le fait une extraction

VI .2.2.1. Méthodes d'extraction du calcium de la spiruline

L'extraction s'effectue à partir de la poudre séchée de spiruline avec de l'eau bouillante. L'extract aqueux recueilli est ensuite traité à l'acide trichloroacétique 10 %. La fraction soluble est ensuite purifiée par distillation suivie ensuite par une lyophilisation. La purification s'effectue par filtration sur gel sephadex et seule une fraction sur les trois obtenues permet de recueillir le polysaccharide calcium-spirulan.

Les différentes méthodes d'extraction exposées ont été à la base des essais visant à étudier l'action spécifique des molécules de phycocyanine et de calcium-spirulan (Sébastien, 2008).

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

Les spirulines(*Arthrospira platensis*), sont des cyanobactéries qui ont une composition chimique riche en différentes constituantes, parmi ces derniers le composant majeur est les protéines, les lipides ,les glucides, ainsi que les vitamines et les minéraux.....etc.

Cette composition donne à la spiruline(*Arthrospira platensis*), un statut très important qui sera impliqué dans le monde car sa richesse alimentaire, donc cette dernière fais partie d'un indicateur de développement mondiale dans des plusieurs domaines, dans ce but les pays d'Afrique font une vaste culture impliquée surtout au Tchad, Cote d'Ivoire, Borkina Faso...etc. pour la lutte contre la malnutrition et aussi pour l'amélioration des produits énergétiques.

De même la spiruline(*Arthrospira platensis*), est un complément alimentaire ; plusieurs chercheurs font des expériences sur son effet thérapeutique et sanitaire ils ont trouvé que son intérêt touche plusieurs domaines de vie.

Ce travail se base sur l'étude des fractions biochimiques et montre la valeur et l'intérêt fonctionnel des constituantes essentielles de la spiruline(*Arthrospira platensis*) qui est actuellement l'aliment de santé, car son utilisation pharmaceutique aux différents produits surtout les produits énergétiques qui assurent le mouvement physique surtout pour les sportifs, et aussi pour faire une dégradation de la famine aux pays pauvres.

Ce travail a visé à la sensibilisation de la société à l'intérêt de la culture et l'utilisation de la spiruline et son intégration dans notre régime alimentaire, Ce travail constitue aussi une initiation à l'introduction de la spiruline dans cette région saharienne et d'autres études pratiques seront nécessaires à la maîtrise de sa culture.

ANNEXES

ANNEXES

Annexe 1 : Photos d'illustration des expériences réalisées à Toliara.
(TSARAHEVITRA, 2005)

Préparation de milieu de culture en laboratoire de Spiruline à l'Institut Halieutique et des Sciences Marines.



1- Traitement de l'eau de mer (décantation, siphonage)



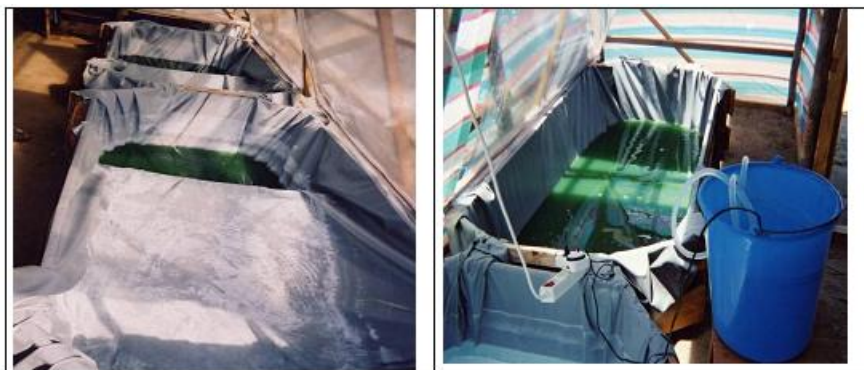
2-Multiplication de la souche en laboratoire dans des bouteilles, des erlènes de 5 l et des cuves de 40 l



3-Bassin de culture (première construction et après réhabilitation)



4-de l'eau de mer dans le bassin de 2 m² et de 10 m²



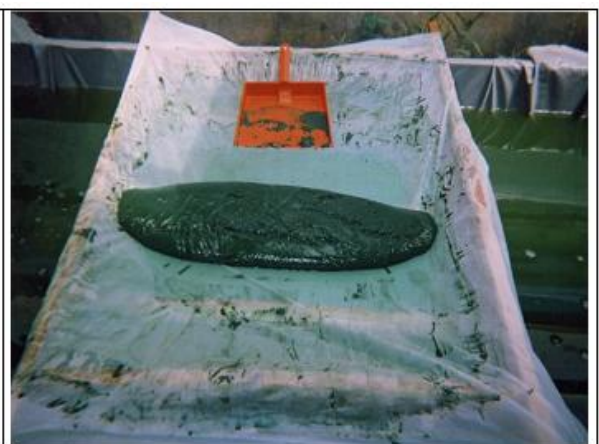
5-Multiplication de la souche en bassin de 2 m²



6-Culture en bassin de 10 m²



7-Récolte : Filtration



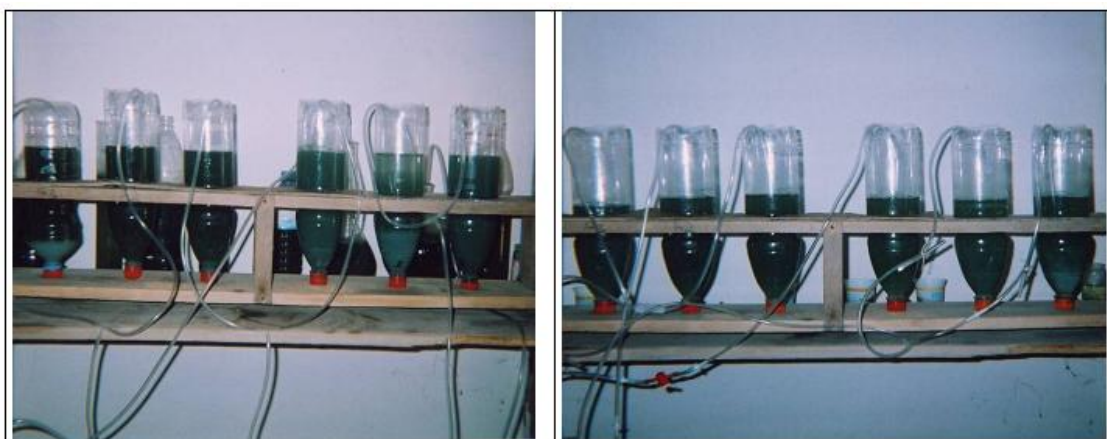
8- Pâte épaisse de Spiruline sur la toile de filtration



9-Pressage



10-Extrusion, séchage à l'étuve et Spiruline sèche sur des claies de séchage



11-Expérience sur la souche « Paracas » à gauche et « Malgache » à droite

Annexe 2 : Principaux produits contenant de la spiruline sur le marché (1/2)
(SGUERA, 2008)

Laboratoire Nom du produit	Indications	Posologie Quantité de spiruline par unité	Photo
ARKOPHARMA Arkogélule Spiruline	- fatigue, convalescence - complément diététique du sportif - apport protéiné en période d'amincissement	2 gélules matin, midi et soir, à prendre avec un grand verre d'eau au moment des repas 390 mg par gélule de poudre totale cryobroyée, titrée à 55 % de protéines	
3 CHENES Chrono energy 1000	- Fatigue - Baisses de forme régulières	1 comprimé le matin au cours du petit- déjeuner et 1 comprimé le soir au cours du dîner. 100 mg par comprimé	
BIORGA Ecophane 60 cpr	- Nourrir, fortifier et aider la croissance des ongles et des cheveux	2 comprimés par jour pendant 3 mois 7,5 mg par comprimé	
MARCUS ROHRER Marcus Rohrer Spirulina 540 cpr	- Effet tonique général - Revitalisant	2 comprimés 3 fois par jour pendant 1 mois 300 mg par comprimé	

Annexe 3 : Principaux produits contenant de la spiruline sur le marché (2/2)

Laboratoire Nom du produit	Indications	Posologie Quantité de spiruline par unité	Photo
ESTHEDERM Intensif Spiruline	- Crème revitalisante haute concentration spécifique pour les peaux fatiguées et dévitalisées	Appliquer la crème sur la peau propre et sèche du visage, cou et décolleté après le Sérum Intensif Spiruline.	
ESTHEDERM Intensif Spiruline Sérum	- Sérum revitalisant haute concentration spécifique pour les peaux fatiguées et dévitalisées	Appliquer le Sérum Intensif à la Spiruline sur la peau propre et sèche avant la Crème Intensive à la Spiruline et faire Pénétrer	
FORTE PHARMA 100% Abdos Men	- Activer la construction des muscles - Réduire la masse grasse	1 comprimé et 1 capsule matin et soir 50 mg par comprimé	
ALPHA BIOTECH Spirulysat	- Recommandée pour un rétablissement plus rapide après des maladies inflammatoires, de grosses fatigues ou des carences importantes	1 ampoule par jour pendant 20 jours 110 mg d'extrait dont 8 mg de phycocyanine	

Annexe 4 : Aliment pour bébés. (FANIDA, 2012)



Contient de la spiruline ! (les biberons sont verts)

Prémi®amande est une céréale instantanée à complément protéinique destiné à être utilisé pendant la période de sevrage des nourrissons et comme complément à l'alimentation des enfants en bas âge et/ou en vue de leur adaptation progressive à une alimentation normale

A partir du 4ème mois.

Résumé

Ce travail a pour but de connaître l'intérêt biochimique de la spiruline (*Arthrospira platensis*), aussi son utilisation aux différents domaines de vie à cause de sa richesse en plusieurs composantes alimentaires essentielles. Actuellement la spiruline a une large culture au différents pays dans le monde même en Algérie(Tamanrasset, Ouargla).

La spiruline est considérée actuellement comme un aliment complémentaire à base protéique, c'est pour cela; elle est le meilleur outil contre la malnutrition qui touche surtout l'Afrique donc la culture de cette espèce d'algue va faire une évolution au niveau de récolte alimentaire en diminuant les conséquences liées à la malnutrition .

Mots clés: La spiruline, *Arthrospira platensis*, intérêt techno fonctionnel , cyanobactérie, malnutrition.

Abstract

The objective of this work is to identify the biochemical significance of Spirulina (*Arthrospira platensis*) , so their use in various areas of life because of its high number of essential dietary components that work aims. Currently spirulina has a wide culture different paid in the world even in Algeria (Tamanrasset, Ouargla).

Spirulina is currently considered a complementary food based on protein, if it's for, it is the best tool against malnutrition that affects mostly African culture so that algal species will be an evolution in food crop reducing the consequences of malnutrition.

Keywords: Spirulina, *Arthrospira platensis*, interest tecno functional cyanobacterium, malnutrition.

ملخص

الهدف من هذا العمل هو التعرف على الأهمية البيوكيميائية للسبيرولينا (*Arthrospira platensis*) بما في ذلك استعمالاتها الواسعة في مختلف مجالات الحياة و هذا لغنى هذه الأخيرة بعدة مركبات غذائية ضرورية . إذا حاليا عدة دول تقيم زراعة واسعة لهذا الطحالب بما في ذلك الجزائر (تمنراست ورقلة) .

تعد السبيرولينا حاليا بمثابة غذاء كامل يتكون أساسا من البروتين لهذا تعد الوسيلة الأنجع لمكافحة ظاهرة سوء التغذية التي تمس بالأخص دول القارة الإفريقية فزراعة هذا النوع المهم من الطحالب من شأنه إحداث تطور كبير في الإنتاجية الغذائية التي تساهم بدورها في التقليل أو القضاء على المجاعة

الكلمات المفتاحية : السبيرولينا, الأهمية الوظيفية , الطحالب الزرقاء المخضرة , سوء التغذية.

RÉFÉRENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- 01-Andres I. (1981). Les Algues. 61p.
- 02-Anonyme. (2007). Complément d'information sur la spiruline. Saint Augustin. Fabrication artisanal France. Ed . 1-15.
- 03-Anonyme. (2009). Algues. FEPS: 1-2.
- 04- Anonyme. (2009). La nutrition. Hes. So. Heds, Genève. 7p.
- 05-Anonyme. (2011). Les algue. Eau et rivières. Ed. 1-9.
- 06-Bellay A. (1993). Connaissances sur les bénéfices de la spiruline sur la santé. Journal of applied phycology. Ed. 1-235.
- 07-Bensalem M. (2009). La spiruline peut-être un atout pour la santé et le développement en Afrique. Revue critique réalisée par cinq experts à partir de documents d'étape. Ed.1-22.
- 08-Bernard O., Cadoret J. (2008). La production de biocarburant lipidique avec des microalgue : promesses et défis, journal de la société de biologie.1-16.
- 09-BOURRELLY P. (1985). Encyclopédie universalise. Corpus 5, Cloîtres. Design, éditeurs à Paris.
- 10-Charlemagne D. (2008). La spiruline : aliment santé ?. Thèse de doctorat : Pharmacie, France université de marseille, 98p.
- 11-Christophe Girardin A. (2007). La spiruline. Faculté de médecine paris. Ed. 1-16.
- 12-Dankoko B. (1999). La spiruline : une source alimentaire a promouvoir. Médecine d'Afrique noire. Ed. 1-46.
- 13-DE RIVIERS Bruno. (2003). Biologie et phylogénie des algues. Tome 2, 2eme edition, Belin.
- 14-Denis V. (2011). La spiruline et les sportifs. ANTENNA TECHNOLOGIE. Ed. 1-22.
- 15-Déogratias K. (2003). La malnutrition et ses conséquences dans le monde. Rapport du séminaire fait à kazongo. Ed . 1-28.
- 17-Doumandji A., et al. (2012). Etude de l'impact de l'incorporation de la spiruline sur les propriétés nutritionnelles technologie et organoleptique du couscous artisanale. Nature et technologie. Ed.1-50.
- 18-Elyah A. (2001-2003). Quel avenir pour la spiruline ?. Ed. BOURKINA FASO. 27p.
- 19-Falquet J., Hurni J. (2006). Spiruline aspects nutritionnels. Ed. ANTENNA TECHNOLOGIES, BOURKINA FASO. 41p.
- 20-Falquet J. (2006). Le séquençage complet de la spiruline. Ed. ANTENNA TECHNOLOGIE, SUISSE. 99p.

- 21-Falquet J. (2006). Un module d'apprentissage pour la production de spiruline. ANTENNA TECHNOLOGIE. Ed. 1-15.
- 22-FALQUET J. (1996). Spiruline : Aspects nutritionnels, document Antenna Technologie, Genève.
- 23-Falquet J. (2006). Malnutrition. ANTENNA TECHNOLOGIE. Ed. 1-11.
- 24-Falquet J. (2006). La spiruline. ANTENNA TECHNOLOGIE. Ed. 1-4.
- 25-Fanida B. (2012). Petites nouvelles de la spiruline. Spiruline de Giens. EFOIR. 1-10.
- 26-FELDMANN J. (1985). Encyclopédie universalise. Corpus I, Aalto anabaptisme, Editeurs a Paris.
- 27-Geneclie M. (2011). Etude de l'environnement économique du secteur de la spiruline en coté d'ivoire. Rapport de mission projet rogead. Ed.1-28.
- 28-GRASSE P.P., et FELDMANN J. (1963). Botanique. Anatomie cycles évolutifs systématiques. Masson, Paris.
- 29-Gustavson K., et al. (2000). Bénéfices pour la santé. Sophi nature. Ed. 1-6.
- 30-Hug C., et al. (2011). Bilan et perspectives. ANTENNA TECHNOLOGIE. Ed. 1-30.
- 31-Jean-Paul J. (1999). Cultivez votre spiruline. Ed. ANTENNA TECHNOLOGIE, SUISSE. 125p.
- 32-Josephen K. (2007). Bonne et heureuse année à tous les amis de la spiruline artisanale et solidaire. Spiruline artisanale. Ed.1-10.
- 33-Loïc C., et al. (2003). Utilisations de la spiruline autrement que pour traiter la malnutrition. Ed tulear, Marseille. 86p.
- 34-Loic C. (2004). Cyanobacteria for health IOPR. Ed. Madagascar. 58p.
- 35-Loic C., Nardo V. (2004). Colloque international sur les cyanobactéries pour la santé. La science et le développement. Thèse de doctorat : Biochimie. France : Institut océanographique Paul Ricard. 203p.
- 36-Madurai I. (2002). La spiruline contre la malnutrition accompagnement du film. Ed, Inde. 89p.
- 37-Mahamat S. (2003). Utilisation et consommation de la spiruline. Ed. INTERNATIONAL WORKSHOP, Tchad. 336p.
- 38-Marfaing H. (2007). Les algues ont-elles une place en nutrition ?. CEVA. 1-7.
- 39-Murielle T. (2010). Le joyau bleu de la spiruline. Nutrithérapie. Vol.116 : 1-84.
- 40-Nikiéna J., et al. (2009). Stratégie d'utilisation des substances naturelles dans la prise en charge des personnes vivant avec le VIH : Dossier spéciale de médecine traditionnelle en Afrique. ETHNOPHARMA. Ed. 1-5.

- 41-NULTSCH W. Mars (1998). Botanique générale (traduction de la 10e édition allemande par Roger Miesch et Yves Sell), de Boeck université : Thieme Verlag, Paris. ROGER CAETINI, (1976). Boards Encyclopédie, Bordas .Paris
- 42-Saidi N., et al. (2011). Propriétés pharmacologiques et biologique d'un mélange de poudres de dattes (MECH-DEGLA) et de spiruline. Thèse de doctorat : Technologie alimentaire. Boumerdès (ALGERIE).Algérie, 80p.
- 43-Sguera S. (2008). Spiruline platensis et ses constituants intérêts nutritionnels et activités thérapeutiques. Diplôme d'état de docteur en pharmacie : Pharmacie. Université Henri Poincaré (Nancy). 128p.
- 44-Tsaraherrtra J. (2005). Adaptation de la spiruline de sud de Madagascar à la culture en eau de mer mise au point de structures de production à l'échelle villageoise. Thèse de doctorat Es sciences en océanologie appliquée : Océanologie appliquée. Institut de recherche pour le développement. Université de Toliara. 183p.

.