

UNIVERSITE KASDI MERBAH DE OUARGLA
FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE
DEPARTEMENT DES SCIENCES AGRONOMIQUES



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
En vue de l'obtention Du diplôme D'Ingénieur d'Etat en Agronomie

Spécialité : Technologie Alimentaires

THEME

Etude comparative entre deux souches de spiruline (d'origine algérienne et du Camerounais) : caractérisation physico-chimique et activités biologiques

Présente par : Melle. BAADI Nadia
Melle. MENADI Meriem

Devant le jury composé de :

Présidente de jury	Professeur	SIBOUKEUR O.	UKMO
Promotrice	MAB	LOUNICI S.	UKMO
Examineur	MAB	CHOUANA T.	UKMO
Examineur	MAB	LOUNI S.	UKMO

Remerciement



Nous remercions en premier lieu:

« Dieu » le tout puissant, qui nous a donné le courage, et la volonté pour continuer nos études.

Nos vifs et sincères remerciements vont à nos parents qui y ont fortement contribué.

On tient à remercier :

Notre promoteur Madame LOUNICI S. pour avoir accepté d'encadrer la réalisation de ce travail , aidées et guidées pour effectuer ce travail ; Merci pour vos corrections et vos conseils.

Madame SIBOUKEUR O. qui nous fait l'honneur d'accepter la présidence de jury; Merci pour la qualité de vos corrections et vos conseils.

Monsieur LOUNI S. et Monsieur CHOUBANA T. pour avoir bien voulu examiner ce travail ; Merci pour la qualité de vos corrections.

Nous remercierons Chef département Monsieur GAZOUL O.

Nous remercierons Dr. HIRJAËK. Et l'association saharaspirulina.

Nous remercierons Dr. LOUNICI M. Et Melle TAHIRI K, Et Mme CHAHMA D. pour aider à ce travail

Enfin, nous remercierons tout les personnes qui de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce modeste étude.



Meriem et Nadia
Juin 2014

Introduction

Dans le monde, plus de 800 millions de personnes souffrent de sous-alimentation dont 200 millions d'enfants de moins de 5 ans. 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 les ressources alimentaires non conventionnelles a été adoptée une algue bleue qui offre jusqu'à 70 % de protéines, de sels minéraux, des oligo-éléments et de nombreuses vitamines: c'est la *Spiruline*.

La spiruline (*Arthrospira* sp.) est une cyanobactérie alimentaire, de 0,2 à 0,3 mm de long. Souvent considérée comme une algue bleu-vert (LEONARD et al., 1967 ; MARTY et al., 1970 ; CLEMENT, 1971), elle est parmi les algues les plus produites dans le monde pour la consommation humaine (GUILLOU, 2006).

La spiruline, aliment santé par excellence, est douée d'une forte activité antioxydante. Elle prévient des maladies cardiaques (KALAFATI et al., 2010), peut réguler la glycémie, la tension artérielle et le cholestérol (PARIKH et al., 2001).

Le cholestérol, est un stérol présent dans les graisses animales. Il est synthétisé dans le foie. Il est indispensable à la constitution des membranes cellulaires de l'organisme. Il est le précurseur des hormones stéroïdiennes surrénaliennes et sexuelles. En cas d'excès, l'hypercholestérolémie est responsable de plusieurs maladies cardiovasculaires et l'infarctus du myocarde en particulier. Ainsi, les triglycérides présents en excès dans le sang constituent un véritable fléau.

Plusieurs recherches ont prouvé l'efficacité de la spiruline dans le traitement de l'hypercholestérolémie et l'excès des triglycérides ; mais aucun travail n'a précisé la fraction de la spiruline responsable de cet effet.

A partir de ce contexte, nous avons cherché à étudier l'effet de plusieurs extraits de spiruline sur le cholestérol et sur les triglycérides.

Ce travail a pour but, donc, de répondre aux problématiques suivantes :

- Est-ce-que la *fusiformis* et la *platensis*, cultivées en Algérie et au Cameroun existent-t-ils des différences composition bromatologique ?
- Est-ce-que la spiruline exerce un effet de dégradation sur le cholestérol et les triglycérides ?
- A quelles fractions peut-on attribué cet effet de dégradation « cholestérol et triglycérides ».

Pour répondre à ces problématiques, nous avons commencé par une caractérisation physico-chimique des deux spirulines étudiées. En suite l'effet sur le cholestérol et lestriglycérides a été mené *in vitro* : nous avons testés différentes concentrations de la spiruline.

En vue de la détermination des fractions de la spiruline qui affectent le cholestérol et les triglycérides, quatre extractions ont été réalisées. Qu'il s'agit de l'extrait de phycocyanine, des exo-polysaccharides ou de polyphénols : l'effet, *in vitro*, a été déterminé.

Chapitre I. Présentation de la spiruline

I.1. Généralités

La spiruline fait partie des micro-organismes : ni végétale ni animale, elle est classée parmi les **cyanobactéries**(KÖNIG, 2007). Ce groupe comprend l'ensemble des bactéries autotrophes, c'est-à-dire capables d'utiliser l'énergie de la lumière pour la photosynthèse(ROGER, 2006).Mais, contrairement aux algues et aux plantes également dotées de ce pouvoir photosynthétique, elle appartient à l'embranchement des procaryotes, car elle n'a pas de noyau bien individualisé. A noter que cette appartenance à la classe des cyanobactéries est récente. En effet, elle est longtemps restée classée parmi les « algues bleu-vert », ce pour plusieurs raisons :

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

Il existe à ce jour 200 genres et environ 1 500 espèces de cyanobactéries connues ; étant très difficiles à détecter, il en reste sans doute encore beaucoup à découvrir.

La spiruline est la plus connue de toutes ; d'un point de vue taxonomique, elle appartient à l'ordre des *Nostocales*, à la famille des *Oscillatoriaceae* et au genre *Arthrospira*(OBJECTIF SCIENCES, 2006, ANTENNA TECHNOLOGIES, 2007).

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

En pratique, il faut retenir que le terme "Spiruline" correspond au nom commercial d'une espèce de cyanobactérie alimentaire appartenant toujours au genre *Arthrospira*. Le mot « *Spirulina* » est le nom commercial anglophone de la spiruline, mais il désigne également un genre de cyanobactérie assez éloigné de *Arthrospira*, et surtout non comestible (par exemple : *Spirulina major*, *Spirulina subtilissima*, *Spirulina princeps*, *Spirulina gigantea* ou *Spirulina subsalsa*)(FOX,1999).

La spiruline est une cyanobactérie qui transforme le gaz carbonique et la matière organique, à partir de la lumière grâce aux pigments qu'elle contient (dont la phycocyanine bleue, la chlorophylle verte et les caroténoïdes orangés) qui possèdent le spectre d'absorption de la plus grande longueur d'onde parmi les cyanobactéries marines.

A partir de la lumière, de son équipement pigmentaire et des sels minéraux de l'eau, la spiruline devient une formidable usine à produire des protéines et autres constituants indispensables, (CLEMENT, 2006).

Les spirulines, cyanobactéries traditionnellement consommées depuis des siècles par certaines populations autrefois classées parmi les "algues bleues-vertes" elles ne sont pas à proprement parler des cyanobactéries.

Elles croissent naturellement dans les eaux alcalines de certains lacs, en zone chaude, d'une taille de l'ordre de 0,1 mm, elles se présentent généralement comme de minuscules filaments verts enroulés en spire plus ou moins serrés et nombreux suivant les souches (FALQUET, et HURNI, 2006).

I.1.1. Classification de la spiruline.

Division : Cyanobactérie

Classe : Cyanophyceae

Ordre : Oscillatoriales .

Famille : Phormidiaceae .

Genre : *Arthrospira*.

Espèces :

- *Arthrospira fusiformis*.
- *Arthrospira indica*.
- *Arthrospira masartii*.
- *Arthrospira maxima*.
- *Arthrospira platensis*.

I.2. Biologie et caractères généraux

I.2.1. Morphologie

La spiruline est une algue bleu-vert (cyanobactérie) microscopique. Elle est à peine visible l'œil nu, d'une longueur moyenne d'environ 250µm, elle est composée de filament mobiles de 10 à 12 µm de diamètre non ramifiés et enroulés en spirale. Ce filament est appelée trichome, sa forme hélicoïdale, observable uniquement en milieu liquide, est caractéristique du genre(CRUCHOT, 2008).

La spiruline est de type GRAMNEGATIF et procaryote vrais malgré son système énergétique photosynthétique, elle est riche en chlorophylle et en phycocyanine(FALQUET, 1996).On distingue deux espèces principales de spirulines :

➤ *Spirulinaplatensis*

C'est la plus connue et la plus utilisée lors des travaux de recherche ou lors de l'ensemencement de nouvelles cultures.Elle se compose de trichomes atteignant 350 µm de long et entre 6 et 12,45 µm de diamètre ; ils sont un peu rétrécis au niveau des articulations.

Les tours de spire ont un diamètre de 20 à 50 µm, diminuant légèrement vers les extrémités(FOX D. ET R 1999).

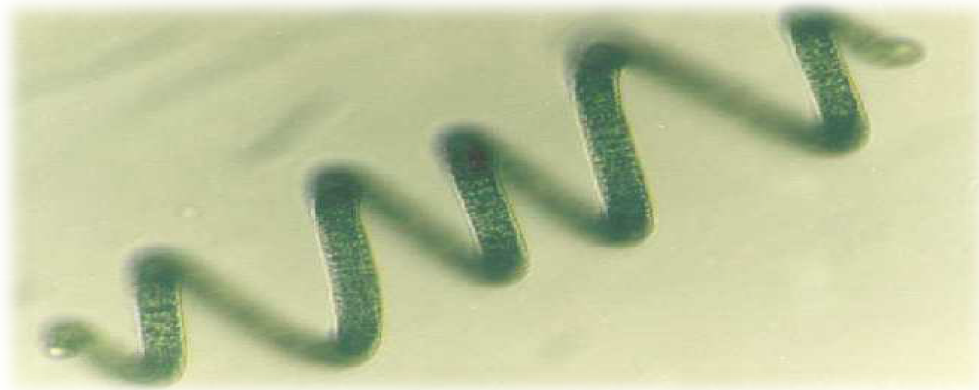


Figure 1 : Spirulinaplatensis observée au microscope (JOURDAN ;2006).

➤ *Spirulina maxima*

Cette spiruline se caractérise par des trichomes de 70 à 80 µm de long, de 7 à 9 µm de diamètre et légèrement effilés aux extrémités;ils forment une spirale régulière de 3 à 8 tours et de 40 à 60 µm de diamètre.

Les cellules constituant des trichomes mesurent entre 5 à 7 μm de long et ne rétrécissent pas au niveau des articulations. (HELENE, 2008)

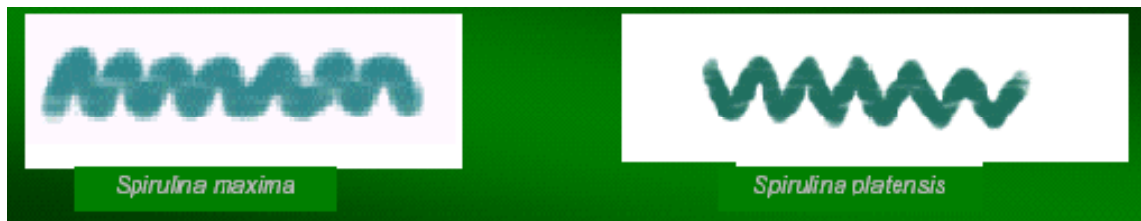


Figure 2 : Filaments des deux espèces de spiruline observés au microscope optique
(HELENE, 2008)

I.2.2. Déplacement

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

Le trichome exerce un mouvement oscillatoire, de forme hélicoïdale, en rotation autour du grand axe. La spiruline peut donc évoluer dans l'eau en se vissant ; ce déplacement s'effectue à la vitesse de 5 μm par seconde. La microscopie électronique a permis de comprendre la motilité des filaments (DOUMENGE *et al*; 1993).

La spiruline peut également fabriquer des vésicules de gaz d'environ 70 nm de long et 10 nm de diamètre, faites d'une chaîne de protéines tissées. Ces vésicules ressemblent à des tubes creux cylindriques comportant des capuchons coniques. Elles se trouvent habituellement près des parois terminales des cellules et sont empilées les unes sur les autres, elles se forment et se remplissent de gaz lorsque la lumière du soleil apparaît : tels des ballons dirigeables, elles permettent au filament de spiruline de remonter en surface pour recevoir la lumière et ainsi commencer la photosynthèse (FOX RIPLEY, 1999).

A la fin du jour, les cellules sont surchargées par les grandes quantités d'hydrates de carbone fabriqués, lesquels engendrent une haute pression osmotique interne. Ne pouvant plus supporter cette pression, les vésicules implosent. Le gaz libéré est comprimé et absorbé par les fluides environnants. Les vésicules s'effondrent et le filament de spiruline redescend vers le fond obscur. Pendant la nuit, grâce au phénomène de respiration précédemment décrit, la majeure partie des hydrates de carbone accumulés est convertie en protéines, pendant que du CO_2 est perdu. Pour recommencer un cycle de photosynthèse le lendemain, de nouvelles vésicules de gaz se forment de sorte que les filaments de spiruline soient à la surface de l'eau avant l'aube (FOX D, *et R* 1999).

Par conséquent, on peut en déduire qu'une limitation en CO₂ augmente la flottabilité alors que la production d'hydrates de carbone la diminue. Ces deux méthodes de locomotion permettent à la spiruline de se protéger elle-même contre une overdose mortelle de soleil (CRUCHOT, 2008).

I.2.3. Reproduction

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

Sa vitesse de multiplication est particulièrement rapide dès que la température dépasse 30°C à l'ombre ; lorsque ces conditions sont réunies et que le milieu est favorable, le temps de génération est très court (7 heures). Les filaments microscopiques se développent simultanément et ils constituent des "fleurs d'eau" également appelés "blooms" (FOX R, 1999).

I.2.4. Aspects nutritionnels

La spiruline présente des propriétés thérapeutiques. Elle renferme plusieurs molécules ayant fait l'objet d'études pour leurs activités biologiques. C'est d'abord l'impressionnant teneur en protéines de la spiruline qui a attiré l'attention des chercheurs comme des industriels. Par la suite, le nombre de propriétés particulièrement intéressantes sur le plan nutritionnel sont apparues : composition protéique équilibrée, présence de acide gras essentiels rares ainsi que de nombreux minéraux et vitamines sans oublier aussi la molécule miracle : « la phycocyanine » (FLAQUET, 1996).

I.2.4.1. Protéines

I.2.4.1.1. Teneur et composition

La spiruline est particulièrement riche en protéines puisqu'elles représentent 50 à 70 % de son poids sec. A noter que les teneurs les plus élevées sont obtenues lorsque la récolte a lieu au début de la période lumineuse. D'autre part, par comparaison avec les autres sources de protéines végétales qui sont toutes moins riches, la spiruline est consommable dans sa totalité (FALQUET, 1996).

D'un point de vue qualitatif, les protéines de la spiruline ont une valeur biologique très haute car elles renferment tous les acides aminés essentiels pour l'adulte (tableau 02) ; ceux-ci représentent 47 % du poids total des protéines.

Les acides aminés essentiels les moins représentés sont les molécules soufrées: méthionine et cystéine ; ils sont toutefois présents à plus de 80 % de la valeur idéale définie par la FAO (sur la base de l'albumine de l'œuf et de la caséine).

Il a été démontré que le séchage sur tambours chauffants utilisé lors de la production industrielle, réduit de 30 % environ la teneur en méthionine par rapport au séchage par pulvérisation (VERMOREL *et al.*, 1975). A noter que l'histidine et la cystéine sont considérés essentiels chez les nouveau nés et enfants jusqu'à l'âge de 10 ans ; l'arginine est aussi rattachée aux acides aminés essentiels car notre organisme n'en produit pas assez (FLAMANT VERT, 2008).

Tableau 01: Teneur de la spiruline "Flamant Vert" en acides aminés (Compagnie Tourne Sol, 2007).

Acides aminés	Teneur en g/kg de spiruline (poids sec)
Alanine	47
Arginine	43
acide aspartique	61
acide aspartique	91
Cystine	32
Histidine	10
Isoleucine	35
Leucine	54
Lysine	29
Méthionine	14
Phénylalanine	28
Proline	27
Sérine	32
Thréonine	32
Tryptophane	9
Tyrosine	30
Valine	40

✓ **En gras** : acides aminés essentiels.

Le profil de référence des acides aminés (tableau 02) permet d'évaluer la qualité des protéines alimentaires.

Tableau 02 : Profil recommandé pour la teneur en acides aminés des protéines alimentaires.
(OTTEN et al., 1999).

Acide amine	Profil recommande (en mg par g de protéine)	Vealeur en g/kg de spiruline
Histidine	18	10
Isoleucine	25	35
Leucine	55	54
Lysine	51	29
Méthionine + Cystéine	25	14
Phénylalanine + Tyrosine	47	28
Thréonine	27	
Tryptophane	7	9
Valine	32	40

I.2.4.1.2. Utilisation protéique nette

L'utilisation des protéines ingérées est déterminée par la digestibilité, c'est-à-dire la proportion d'azote protéique réellement assimilée par l'individu.

Contrairement à d'autres micro-organismes proposés comme source de protéines (levures, chlorelles...), la spiruline ne possède pas de paroi cellulosique ; elle a donc l'énorme avantage d'être parfaitement digestible sans cuisson ni autre traitement destiné à rendre ses protéines accessibles. Leur digestibilité est évaluée à 83 %. La valeur nette d'utilisation protéique est estimée entre 53 et 61 % (FALQUET, 1996).

I.2.4.2. Lipides

I.2.4.2.1. Lipides totaux

Les systèmes d'extraction actuels permettent une quantification plus précise que dans le passé : le pourcentage des lipides totaux est compris entre 6 et 13 % du poids sec en spiruline. Ces lipides totaux peuvent être séparés en une fraction saponifiable (83 %) et une fraction insaponifiable (17 %).

La fraction saponifiable est surtout composée de monogalactosyldiglycérides et de digalactosyldiglycérides (23%), de sulfoquinovosyldiglycéride (5%), et de phosphatidylglycérol (25,9 %). Les triglycérides sont rares (0,3 %) et on détecte en outre 4,6% de phospholipides indéfinis(*FOX D. ET R. ,1999*).

I.2.4.2.2. Acides gras

Les acides gras se distinguent par la longueur de leur chaîne carbonée et leur degré d'insaturation.

Les acides gras essentiels sont des acides gras polyinsaturés classés en deux groupes (oméga-3 et oméga-6), selon la position de l'insaturation la plus proche du groupe méthyle terminal. Ceux du groupe oméga-3 jouent un rôle préventif sur les risques cardiovasculaires, tandis que les acides gras oméga-6 ont un rôle hypocholestérolémiant.

Les besoins en acides gras essentiels correspondent à 1 à 2 % des calories journalières chez l'adulte et à 3 % de ces calories chez les enfants. Actuellement, les nutritionnistes recommandent une alimentation fournissant un rapport oméga-6/oméga-3 situé entre 4 et 5. (*OTTENet al, 1999*)

Le profil en acides gras de la spiruline *Arthrospiraplatensis* est rapporté dans le (tableau 03).

La spiruline est considérée comme l'une des meilleures sources alimentaires connues d'acide γ -linolénique, après le lait humain et quelques huiles végétales peu courantes, fort chères et non chauffées (huiles d'onagre, de bourrache, de pépin de cassis et de chanvre).

La spiruline renferme 10 g de cet acide gras et 8 g d'acide linoléique par kg de matière sèche.

La présence d'acide γ -linoléique est à souligner du fait de sa rareté dans les aliments courants et de sa haute valeur alimentaire présumée. C'est en effet un acide gras essentiel qui joue un rôle clé au niveau de la régulation des mécanismes cellulaires.

Tableau 03 : Profil « moyen » en acides gras d'*Arthrospiraplatensis* (FALQUET ; 1996).

Acides gras	% des acides gras totaux
Palmitique (16:0)	25 à 60 %
Linoléique (18:2) oméga-6	10 à 30 %
gamma-linoléique (18:3) oméga-6	8 à 40 %
Oléique (18:1) oméga-9	5 à 16 %
palmitoléique (16:1) oméga-6	0,5 à 10 %
stéarique (18:0)	0,5 à 2 %
alpha-linoléique (18:3) oméga-3	Traces

I.2.4.2.3. Lipides insaponifiables

Ils sont essentiellement représentés par des paraffines (25 % : hydrocarbures saturés à longues chaînes), des alcools terpéniques (5 à 10 %) et des stérols (1,5 %) (FALQUET, 1996).

I.2.4.3. Glucides

Les glucides représentent 15 à 25 % de la matière sèche des spirulines. L'essentiel des glucides assimilables est constitué de polymères tels que des glucosanes aminés (1,9 % du poids sec) et des rhamnosanesaminés (9,7 %) ou encore de glycogène (0,5 %) (*FALQUET, 1996*). Les glucides simples ne sont présents qu'en très faibles quantités : ce sont le glucose, le fructose et le saccharose. On trouve aussi des polyols comme le glycérol, le mannitol et le sorbitol.

En effet, les parois cellulaires des spirulines s'apparentent à celles des bactéries Gram-négatif ; en effet, elles sont formées de glucosamines et d'acide muramique associés à des peptides. Bien que non digestibles, ces parois étant relativement fragiles, le contenu cellulaire est très facilement accessible aux enzymes de digestion.

Sur le plan nutritionnel, la seule substance glucidique intéressante par sa quantité chez la spiruline est le méso-inositol phosphate qui constitue une excellente source de phosphore organique ainsi que l'inositol (350 à 850 mg/kg matière sèche). Cette teneur en inositol est égale à environ huit fois celle de la viande de bœuf et à plusieurs centaines de fois celle des végétaux qui en sont les plus riches.

A noter que des recherches ont déjà été menées concernant les polysaccharides de la spiruline, lesquels exerceraient des effets stimulants sur les mécanismes de réparation de l'ADN.

Un polysaccharide spécifique de la spiruline, le spirulan, a été isolé et partiellement caractérisé (*LEE et al., 2000*). Porteur de nombreux résidus sulfate et contenant de l'acide uronique, il est fortement polyanionique, son squelette consiste essentiellement en méthyl-rhamnose et méthyl-xylose. Au vu des résultats des études publiées, cette substance semble prometteuse dans certaines applications thérapeutiques (*LEE et al ; 2000*).

I.2.4.4. Vitamines

I.2.4.4.1. Le carotène (précurseur de la vitamine A).

La vitamine A est indispensable à tous les âges de la vie. Son rôle primordial dans le mécanisme de la vision est maintenant clairement établi. Elle intervient également dans la régulation (activation, répression) de l'expression des gènes, et se trouve donc impliquée dans de nombreuses fonctions de l'organisme : développement de l'embryon, croissance des cellules, renouvellement des tissus (peau, muqueuse intestinale), système immunitaire...

En plus des propriétés de la vitamine A, le β -carotène peut agir comme antioxydant, notamment grâce à sa capacité à détruire les radicaux libres.

Ce caroténoïde pro-vitaminique représente 40 à 60 % des caroténoïdes présents dans la spiruline. On trouve entre 700 et 2000 mg de carotène et environ 100 à 600 mg de cryptoxanthine par kg de spiruline sèche ; ces deux caroténoïdes sont convertibles en vitamine A par les mammifères (*ALPHA-BIOTECH. ;2006*). Cette conversion du carotène en vitamine A se fait chez l'humain dans une proportion d'environ 17 à 20 %. Cette proportion peut varier selon la dose de β -carotène absorbée et selon l'état physiologique de la personne.

Quelques grammes de spiruline suffisent donc à couvrir entièrement les besoins en vitamine A d'un adulte.

D'autre part, l'absence de rétinol (vitamine A libre) exclut un éventuel risque de surdosage, le β -carotène n'étant pas toxique par accumulation, au contraire de la vitamine A. (chez la femme enceinte, une surdose en vitamine A peut entraîner des malformations du fœtus : ce risque est si réel que l'OMS a établi, en 1998, une série de recommandations en vue de sécuriser l'apport de vitamine A aux femmes en âge de procréer).

Il est également important de noter que les teneurs en β -carotène dans la spiruline peuvent varier en fonction des conditions de séchage, de la granulométrie et des conditions de conservation à long terme du produit final. Les valeurs annoncées au début du paragraphe correspondent à des échantillons de spiruline séchée par pulvérisation, donc sans chauffage ; dans le cas du séchage sur tambours chauffants, ces valeurs seraient diminuées de près d'un tiers. En effet, les caroténoïdes étant très sensibles à l'oxydation, il faut avoir connaissance des procédés de séchage utilisés, de façon à s'assurer de leur préservation dans le produit fini. Du point de vue du carotène, la meilleure méthode de séchage serait la lyophilisation (malheureusement très chère), suivie du séchage en couche mince à température inférieure à 60°C ; en ce qui concerne la conservation à long terme, les formes en flocons ou en semoule grossière de spiruline sont mieux que la forme poudre.

La biodisponibilité des caroténoïdes de la spiruline a été démontrée par plusieurs études menées chez le rat ou le poulet (*MITCHELL et al., 1990 ; ROSS et DOMINY, 1990 ; KAPOOR et METHA, 1993*) et chez l'Homme. De plus, une étude en 1993 portant sur 5 000 enfants indiens d'âge préscolaire, a montré la surprenante efficacité d'une dose quotidienne unique d'un gramme de spiruline sur la déficience chronique en vitamine A (*GIREESH et al., 2004*).

I.2.4.4.2. Les tocophérols (vitamine E)

Les tocophérols sont des composés liposolubles qu'on regroupe sous le terme de vitamine E. Il en existe quatre variétés : l' α -tocophérol (le plus actif), le β -tocophérol, le γ -tocophérol et le δ -tocophérol.

Antioxydante, la vitamine E contribue à neutraliser les radicaux libres qui peuvent s'accumuler dans les membranes lipidiques et tissus gras de l'organisme ; elle joue donc un rôle essentiel dans la protection de la membrane cellulaire.

La teneur mesurée en vitamine E par kg de spiruline sèche est de 50 à 190 mg, ce qui est comparable à celle du germe de blé considéré comme la référence sur le plan de l'apport en cette vitamine. Des disparités de teneur existent et proviennent principalement des conditions de séchage de la spiruline.

Dans son ouvrage, (*FOX RIPLEY ;1999*), Fox considère comme très probable que le séchage par « spray-drying », lequel brise très fortement les filaments de spiruline, réduise considérablement la durée de conservation des vitamines sensibles à l'oxydation, dont la vitamine E.

Par ailleurs, les propriétés antioxydantes du tocophérol vis à vis des acides gras insaturés pourraient expliquer la bonne conservation de ces derniers dans la spiruline séchée.

I.2.4.4.3. Les vitamines du groupe B

Bien que moins riche que la levure en vitamines du groupe B (B12 exceptée), la spiruline constitue néanmoins une bonne source de ces cofacteurs.

Il est intéressant de souligner sa teneur exceptionnelle en vitamine B12, laquelle est de loin la vitamine la plus difficile à obtenir dans un régime sans viande car aucun végétal courant n'en contient.

La vitamine B12 (cobalamine) participe à la synthèse des neuromédiateurs. Elle est aussi le cofacteur d'enzymes catalysant le métabolisme des acides nucléiques et la synthèse de méthionine. C'est une vitamine essentielle au maintien de l'intégrité du système nerveux.

Un déficit en vitamine B12 entraîne une forme d'anémie, appelée anémie de Biermer ou anémie pernicieuse. Celle-ci se caractérise par la présence de globules rouges de très grande taille (macrocytose). La carence peut provenir d'un défaut d'apport alimentaire en cette vitamine (régimes végétaliens stricts, malnutrition) ou d'un défaut d'absorption. D'autre part, des études ont montré que certains états pathologiques entraînent systématiquement une

déficience en vitamine B12 : c'est le cas par exemple des infections à VIH(HARRIMAN *et al.*, 1989 ; RULE *et al.*, 1994).

D'après l'ancienne méthode standard, la teneur en vitamine B12 de la spiruline serait quatre fois plus riche que celle du foie cru, longtemps considéré comme meilleure source. Cependant, il existe une controverse à propos de la biodisponibilité réelle du complexe B12 de la spiruline chez l'homme : une souche de spiruline a été soigneusement étudiée en terme de contenu et d'identité des composés de la famille de la vitamine B12, les corrinoïdes. (WATANABE *et al.*, 1999). Il en résulte que le corrinoïde prédominant (83 %) est une pseudo-B12, le 7-adeninyl cyanocobamide : il ne présente pas d'activité vitaminique B12 chez l'homme mais n'interfère pas dans le métabolisme normal de la vitamine B12. (WATANABE *et al.*, 1999). La véritable vitamine B12 active représente tout de même 17 % à 37% des corrinoïdes totaux (TODD-LORENZ, 1999). Les conditions de culture, influencent ces teneurs.

Ces valeurs indiquent qu'un gramme de spiruline peut couvrir plus de 80 % des apports quotidiens en B12 pour un adulte.

I.2.4.5. Minéraux

Les minéraux les plus intéressants chez la spiruline sont le calcium, le magnésium, le phosphore et le potassium. Les trois premiers minéraux cités sont présents dans la spiruline à des teneurs comparables à celles trouvées dans le lait.

Les quantités relatives de ces éléments dans la spiruline sont équilibrées, ce qui exclut le risque de décalcification par excès de phosphore. Une haute teneur en potassium est également à souligner.

Par ailleurs, la spiruline peut être considérée comme une excellente source alimentaire de magnésium, grâce à sa teneur en chlorophylle. En effet, la molécule de chlorophylle renferme un atome de magnésium en son centre.

Le magnésium contenu dans la spiruline a été démontré biodisponible pour l'Homme. (PLANE *et al.*, 2002).

Il faut garder présent à l'esprit que la carence en magnésium tend aussi à entraîner une carence en potassium, ce dernier n'étant alors plus absorbé par l'organisme. Face à cela, la spiruline, à la fois riche en magnésium et en potassium, semble donc parfaitement indiquée dans les formules de renutrition.

I.2.4.6. Oligo-éléments

Les oligo-éléments présentant le plus d'intérêts dans la spiruline sont le fer, le zinc, le sélénium. Mais elle en renferme d'autres.

I.2.4.6.1. Le fer

Cet oligo-élément, présent dans l'hémoglobine, permet le transport de l'oxygène depuis les poumons vers les tissus irrigués. Il rentre dans la composition des complexes enzymatiques qui catalysent le métabolisme des protéines. A noter également que le calcium et le cuivre agissent en conjonction avec le fer.

Les spirulines naturelles contiennent rarement plus de 500 mg/kg de fer. Par contre, dans le cas des spirulines cultivées, l'ajout au milieu de culture de sels de fer, souvent complexés à l'EDTA (Ethylène Diamine Tétra Acétique) ou à l'acide citrique, élève facilement ces valeurs entre 600 à 1000 mg/kg, voire bien au delà. Il existe même des spirulines titrant près de 6 000 mg/kg en fer²⁺. (SMALL,2007). Cette très haute teneur en fer de la spiruline cultivée est à souligner doublement du fait que les carences en fer sont très répandues, en occident comme dans le tiers-monde, surtout chez les femmes et les enfants (anémies ferriprives), et aussi parce que les bonnes sources alimentaires de fer sont rares. Par comparaison, les céréales complètes, classées parmi les meilleures sources de fer, n'en contiennent que 150 à 250 mg/kg.

De plus, le fer d'origine végétale ne présente qu'une très faible biodisponibilité, à cause de la présence de facteurs anti-nutritionnels (comme les phytates et les tanins) qui empêchent la métabolisation du fer : seul environ 5 % de ce fer est réellement absorbable.

Quant aux suppléments de fer administrés sous forme de sulfate ferreux, ils peuvent poser des problèmes de toxicité, probablement à cause de leur effet pro oxydant et sont souvent responsables de diarrhées ou d'autres signes d'intolérance. Dans le cas de la spiruline, la biodisponibilité élevée du fer a été démontrée tant chez le rat (KAPOOR, MEHTA, 1993) que chez l'homme (PUYFOULHOUX et al, 2001). Cette dernière étude démontre que le fer de la spiruline est mieux absorbé que celui de la viande, ce qui est exceptionnel pour un fer non-héminique.

I.2.4.6.2. Le zinc.

Le zinc participe à la synthèse de nombreuses métallo-enzymes. Il est impliqué dans le métabolisme des glucides (entre dans la composition de l'insuline), des lipides et des

protéines. Chez l'Homme, le zinc est également nécessaire à l'absorption du complexe des vitamines B. Par ailleurs, il est essentiel au bon fonctionnement du système immunitaire. Le zinc participe également à la croissance et au fonctionnement moteur, notamment chez l'enfant. Après la vitamine A, le fer et l'iode, le zinc fait maintenant l'objet d'une très forte attention : il s'agit sans doute du quatrième micro-nutriment majeur dans la lutte contre la malnutrition.

Les protéines animales sont de bonnes sources en zinc biodisponible, mais elles sont souvent rares dans les pays en développement. (HELENE CRUCHOT, 2008)

La spiruline cultivée sans apport intentionnel de zinc dans le milieu de culture n'en contient généralement que des traces (2 à 4 mg pour 100 g de spiruline). Ces valeurs sont insuffisantes pour que ces spirulines puissent être considérées comme de bonnes sources de zinc, puisque les apports journaliers recommandés (AJR) sont de 0,6 à 3 mg/j chez un nourrisson/enfant, de 4 à 12 mg/j pour un adolescent et de 3 à 8 mg/j chez l'adulte. (OTTEN et al, 1999).

Or, la spiruline présente l'avantage de pouvoir être très facilement enrichie en zinc. De ce fait, on trouve actuellement sur le marché des spirulines titrant 6 mg de zinc par gramme.

La biodisponibilité du zinc de la spiruline n'a pas encore fait l'objet de publications scientifiques, mais on peut raisonnablement s'attendre à de très bons résultats au vu de la biodisponibilité prouvée du fer et du magnésium de la spiruline.

I.2.4.6.3. Le sélénium.

Le sélénium est un micro-nutriment essentiel qui intervient dans la protection contre les espèces oxygénées réactives. Il est impliqué dans l'élimination des acides gras peroxydés et, en association avec la vitamine E, dans la destruction des radicaux libres. Les doses quotidiennes recommandées pour l'adulte sont de 50 µg, avec une limite supérieure de sécurité fixée à 400 µg. En effet, une toxicité chronique appelée sélérose, apparaît systématiquement pour des consommations de l'ordre de 5 000 µg/jour (CHEN, 2006).

Plusieurs études démontrent la possibilité d'enrichir la spiruline en sélénium, par addition de sélénite de sodium au milieu de culture (CHEN, 2006 ; LI ZY et al, 2003).

Des essais de supplémentation menés sur des rats artificiellement carencés en sélénium ont abouti à la conclusion que la spiruline enrichie en cet élément était une

excellente source de sélénium(CASES *et al*, 2001); ce chercheur signale par ailleurs que sa biodisponibilité y est élevée.

Néanmoins, contrairement à l'enrichissement de la spiruline en fer ou en zinc, celui en sélénium comporte des risques : tous ces sels sont dangereux à manipuler et de fortes surdoses dans une culture de spiruline n'aboutissent pas à la mort de celle-ci ; elle pourrait alors présenter des niveaux de sélénium potentiellement dangereux en cas de consommation.

I.2.4.6.4. L'iode

Cet élément est indispensable au développement et au bon fonctionnement de la thyroïde. Une carence en iode provoque chez l'enfant de graves et irréversibles troubles du développement. Le risque de carence en iode concerne environ un milliard de personnes sur notre planète ; elle constitue la première cause de maladie mentale évitable.

Les apports quotidiens recommandés en iode sont d'environ 100 µg pour les enfants de 1 à 10 ans et environ 130 µg pour les adultes (OTTEN *et al*, 1999).

Malheureusement, la spiruline qui pousse naturellement ne renferme pas d'iode. Des scientifiques ont donc cherché à l'enrichir en modifiant son milieu de culture. Les publications jusqu'alors disponibles sur le sujet manquent de clarté. D'autre part, comme les sels d'iode sont chers et que la spiruline ne semble pas, en conditions normales, concentrer activement cet élément, il est à craindre que l'enrichissement des milieux de culture n'aboutisse à un fort gaspillage.

I.2.4.7. Pigments, Phytonutriments et enzymes.

La Spiruline contient des chlorophylles dont la chlorophylle *a* (typique des végétaux), des caroténoïdes dont le principal est le β-carotène et des phycobiliprotéines telles la phycocyanine et la phycoérythrine. Les teneurs en pigments d'*Arthrospiraplatensis* apparaissent dans le tableau 04. Ces pigments sont responsables de la couleur caractéristique de certaines espèces de flamants qui consomment cette cyanobactérie(HELENE CRUCHOT, 2008).

Tableau 04 : Teneurs en pigments exprimées en mg pour 10g de matière sèche de *Spirulina platensis* (PIERLOVISI, 2007).

Pigments	Teneur en mg/10g
Chlorophylles totales	115
Chlorophylle a	61-75
Caroténoïdes (orange)	37
Phycocyanine (bleu)	1500-2000
Phycoérythrine (rouge)	2900-10000

Les teneurs en phycocyanine et phycoérythrine varient selon la souche et les conditions de culture. En effet, les teneurs en phycobiliprotéines (qui captent l'énergie lumineuse vers les photosystèmes) sont régulées par l'intensité de l'éclairement. Le Tableau 5 montre que la cyanobactérie *Spirulina platensis* est une excellente source de phycocyanine. D'après Vonshak (1997), la fraction protéique pourrait contenir jusqu'à 20 % de phycocyanine. La phycocyanine aurait une activité antitumorale, elle induirait un mécanisme d'apoptose (autodestruction) des cellules cancéreuses (LI *et al.* 2006). Elle aurait aussi une activité antioxydante (CHOPRA *et BISHNOI* 2007; WU LI-CHEN *et HO JA-AN* 2007). Elle aurait également un rôle d'hépatoprotection (WU LI-CHEN *et HO JA-AN* 2007). En outre, la forte teneur en ce pigment pourrait être d'un grand intérêt industriel.

I.2.4.7.1. Caroténoïdes naturels.

Les caroténoïdes sont de longues molécules très hydrophobes, colorées (jaune à rouge). Dans les caroténoïdes, on distingue d'une part les carotènes, et d'autre part, les xanthophylles : les carotènes sont constitués uniquement de carbone et d'hydrogène alors que les xanthophylles contiennent en plus des atomes d'oxygène. La spiruline renferme un spectre large de 10 caroténoïdes différents. (ANTENNA TECHNOLOGIES, 2004-2007 ; DOUMENGE *et al.*, 1993).

L'ensemble de ses caroténoïdes travaille en synergie au niveau de l'organisme, pour en augmenter la protection face à l'agression des radicaux libres oxygénés.

✓ **Les carotènes.**

La spiruline est l'un des aliments les plus riches en carotène. D'un point de vue quantitatif, 1 kg de spiruline sèche renferme en moyenne 3,7 g de caroténoïdes totaux. La moitié environ sont des carotènes orangés (alpha, bêta et gamma) ; parmi eux on compte environ 1,4 g de carotène.

Le carotène naturel issu des algues a un pouvoir antioxydant nettement plus efficace que celui d'origine synthétique : il est mieux assimilé et contient, en outre, l'isomère 9-cis que l'on ne retrouve pas dans les formulations de synthèse. (ANONYME, 2007). D'après l'étude de FEDKOVIC et al. (1993), les antioxydants comme le β -carotène contenus dans la Spiruline permettraient d'inhiber à la fois l'effet mutagène et l'effet régulateur induit par les radicaux libres, préservant ainsi nos tissus.

✓ **Les xanthophylles**

L'autre moitié des caroténoïdes totaux de la spiruline est constituée de xanthophylles jaunes, soit environ 1,6 g par kg de matière sèche.

Selon un ordre décroissant de leur importance quantitative, on retrouve la cryptoxanthine, l'échinonone, la zéaxanthine, la lutéine et l'euglénanone.

I.2.4.7.2. Chlorophylle.

La spiruline a l'un des taux les plus élevés en chlorophylle que l'on puisse trouver dans la nature (en moyenne 10 g/kg de matière sèche). Elle ne dépasse pas cependant les niveaux de *Chlorella* (2 à 3 %), micro-algue très intéressante sur le plan nutritionnel. La chlorophylle est connue pour son pouvoir nettoyant et purifiant. Ses propriétés aident à détoxifier l'organisme des agressions liées à la pollution. La chlorophylle est parfois appelée le "sang vert" en raison de la très grande ressemblance de sa structure moléculaire avec l'hémoglobine : cette dernière a en effet un atome de fer en son centre, ce qui confère au sang sa couleur rouge de son côté, la chlorophylle a un atome de magnésium qui lui donne sa couleur verte. (ANTENNA TECHNOLOGIES, 2004-2007).

I.2.4.7.3. Phycocyanine

Cette protéine complexe, hydrosoluble, est présente à une hauteur de 150 g/kg de spiruline sèche. La phycocyanine est spécifique de l'algue bleu-vert puisqu'on ne la trouve nulle part ailleurs dans la nature. Elle est apparue un milliard d'années avant la chlorophylle, et peut être considérée comme un précurseur de l'hémoglobine et de la chlorophylle dans la mesure où son noyau renferme à la fois un ion fer et un ion magnésium(*ALPHA-BIOTECH, 2006*).

I.2.4.7. 4. Superoxydedismutase.

Les enzymes sont des catalyseurs de certaines réactions biochimiques. Comme les vitamines, elles sont altérées par la chaleur et détruites par la cuisson. La spiruline en renferme notamment une, laquelle joue un rôle d'antioxydant primaire : la superoxydedismutase (SOD) ; sa teneur est d'environ 1,5 millions d'unités / kg de spiruline sèche. (*ANONYME, 2007*). Les enzymes antioxydantes présentes normalement dans les cellules éliminent de façon permanente et efficace les radicaux libres primaires dès leur formation.

Chapitre II. La spiruline : production et consommation

II.1. Culture de la spiruline

II.1.1. Généralités

En fonction de la surface totale d'exploitation des bassins et des moyens économiques utilisés on distingue la culture familiale, la culture artisanale et la culture industrielle ; pour fixer les idées, la production quotidienne est quantifiée en grammes dans le cadre d'une culture familiale, en kilogrammes dans le cadre d'une culture artisanale et en tonnes dans le cadre d'une culture industrielle (*CRUCHOT, 2008*).

La spiruline trouvée naturellement dans les lacs salés et alcalins des régions chaudes est traditionnellement récoltée sur les rives du lac Tchad et dans d'autres lacs au monde ; mais, il ne faut pas pour autant les surexploiter. La spiruline qui s'y trouve a, en effet plusieurs utilisations :

- Pour les enfants en états de malnutrition, la spiruline améliore leurs états ;
- Elle est utilisée tant qu'aliment pour les flamants qui se trouvent dans ces lacs
- Elle sert de réservoir de spiruline naturelle, utilisables pour débiter et maintenir les cultures de fermes commerciales

II.1.2. Facteurs essentiels pour la culture de la spiruline

II.1.2.1. Localisation

Il faut respecter quelques règles pas toujours évidentes : Pas sous des arbres, ni en un lieu inondable, ni près d'une route ou d'une industrie (pollution). Un terrain plat facilitera le travail, de même que la proximité de l'eau (*JOURDAN, 1999*)

II.1.2.2. Construction des bassins de culture

Pour une production familiale ou artisanale on peut se contenter de bassins de petite taille, sans agitation à roue à aube. Il y a alors de nombreuses façons de construire un bassin adéquat variables selon les conditions locales. Le bassin ne doit pas comporter d'angles vifs, mais des formes arrondies. Le fond doit être aussi plan que possible, avec une très légère pente vers un endroit plus creux d'accès facile (pour faciliter la vidange). Les bords du bassin doivent être au-dessus du niveau du terrain, pour réduire l'entrée des poussières et des animaux, et au

moins 20 à 40 cm au-dessus du fond : mieux vaut prévoir une profondeur assez forte (*JOURDAN, 1999*).

II.1.2.2.1. Bassins en bâches plastique

Une épaisseur de film de 0,25 mm minimum et de préférence 0,5 mm est recommandée. Le film (PVC, polyéthylène,...), de qualité alimentaire et résistant aux Ultraviolets, en fait la solution muret en dur ou en bois est nécessaire en cas de risque d'attaque par des rongeurs. Si l'on doit utiliser du film plastique plus mince, le protéger du contact direct avec le sol et la Maçonnerie.

Pour vidanger et nettoyer un bassin constitué d'une bâche plastique supportée par un muret en dur, un moyen facile est d'abaisser le bord de la bâche près du point de vidange. (*JOURDAN, 1999*).

II.1.2.2.2. Bassins en "dur" (béton, parpaings, briques)

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. Eviter les angles vifs. Soigner l'enduit d'étanchéité. Il est bon d'attendre quelques jours, bassin plein d'eau, avant d'ensemencer en spirulines (sinon l'alcalinité de la chaux ou du ciment frais peut jaunir très rapidement les spirulines). Le mariage béton-film Plastique est aussi une solution, soit que le film double le béton pour l'étanchéiser, Soit qu'une partie du bassin soit en film plastique et l'autre en béton. (*JOURDAN, 1999*)

II.1.2.2.3. Bassins en argile :

Creuser sur 20 cm et faire un talus bien tassé de 20 cm également. 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. La spiruline pousse très bien dans un bassin en argile mais sa pureté bactériologique doit être surveillée de plus près (risques accrus de présence de micro-organismes anaérobies au fond). L'étanchéité n'est pas complète mais elle peut être améliorée avec un film plastique (*JOURDAN, 1999*)

II.1.2.3. Couvertures

Il est souvent utile, voir nécessaire d'installer une serre ou au moins une toile sur le bassin cela permet de protéger contre les excès de pluie, de soleil ou de contre les chutes de feuilles, fientes d'oiseaux, vents de sable et débris, tout en lui permettant de « respirer ». (CRUCHOT, 2008) .Une serre ombrelle et aérer est idéale en tous climats, car permet un contrôle maximal tant de la température, de la lumière, de la pluie et de l'évaporation. (JOURDAN, 1999).

II.1.2.4. L'agitation

Il est impératif d'agiter, au moins occasionnellement (2 à 4 fois par -jours), une culture de la spiruline pour favoriser ainsi une dispersion homogène de la spiruline dans le liquide et son exposition à la lumière.

L'agitation est assurée par de différentes façons : Manuellement, avec un balai ou une rame, avec des pompes n'endommageant pas les spirulines ou avec une pompe d'aquarium.

II.1.3. Milieu de culture

Il s'agit d'une solution de sels minéraux dans l'eau. Ce liquide doit apporter à la spiruline tous les éléments chimiques qui lui sont nécessaires. La culture doit se faire dans une eau à la fois salée et alcaline. L'eau utilisée pour le milieu de culture doit être de préférence potable ou au moins filtrée (JOURDAN, 1997). La spiruline a également besoin pour sa croissance des engrais contenant l'azote, phosphore, potassium, qui sont les trois principaux éléments, mais soufre, magnésium, calcium et fer doivent aussi être ajoutés s'ils ne sont pas apportés en quantité suffisante par l'eau, le sel et les engrais.

II.1. Paramètres influençant sur la culture

II.1.4.1. La température.

La température du milieu culture influence directement sur la vitesse de croissance de la spiruline.

Une température inférieure à 20°C, limite la croissance, et ralentit la multiplication. Au-delà de 40°C, la culture dépérira par un excès de chaleur. La vitesse de croissance est maximale vers 35-37°C au delà de cette température, on risque rapidement une destruction de la culture (JOURADN, 1999).

II.1.4.2. La lumière

Pour leur photosynthèse, les cellules vertes ont besoin de lumière. Au-delà d'un certain éclairage, la lumière endommage la spiruline.

Les cultures qui démarrent avec une faible population, et donc une faible densité optique. Demandent à être ombragées. Pour éviter la photolyse (FOX, 1999).

II.1.4.3. Le potentiel d'hydrogène

Le pH du milieu de culture doit être compris entre 8 et 11 pour obtenir une bonne croissance de la spiruline.

L'alcalinité est habituellement apportée par du bicarbonate de sodium (NaHCO_3), mais ce dernier peut être remplacé, en partie ; par de la soude caustique ou du carbonate de sodium (Na_2CO_3) pour relever le pH initial du milieu de culture (FOX, 1999).

II.1.4.4. L'ombrage

En l'absence de supplémentation en carbone le pH peut monter à 11,5 et plus, mais la spiruline ne peut supporter longtemps un pH supérieur à 11,3. Un demi-ombrage suffit généralement à maintenir le pH en dessous de 11. Si l'agitation est bonne, on peut empêcher la montée excessive du pH sans mettre d'ombrage en maintenant un stock de spiruline élevé ($> 150 \text{ g/m}^2$), c'est-à-dire une concentration en spiruline supérieure à environ $0,7 \text{ g/l}$ pour une hauteur de liquide de 20 cm, ce qu'on peut appeler faire un "auto-ombrage".

L'ombrage est par ailleurs nécessaire quand la température de la culture est trop basse ($< 10^\circ\text{C}$) par grand soleil, sinon la culture peut facilement mourir par photolyse (Jourdan, 1997).

II.1.4.5. Salinité

La salinité correspondant à la somme des poids de tous les sels dissous dans le milieu, elle doit être au minimum égale à 13 g/litre (JOURDAN, 1999).

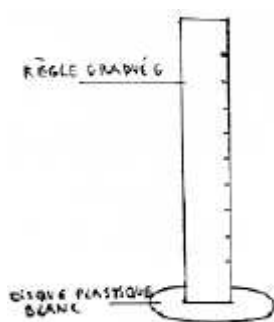
II.1.5. Initiation d'une culture de spiruline**II.1.5.1. Choix de la souche**

Il existe des spirulines (souches) différentes, bien qu'elles aient toutes des caractères communs qui les distinguent des autres cyanobactéries. 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). Pour

ensemencer 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).

II.1.5.2. Mesure de la concentration d'une culture de spiruline

Pour réussir le démarrage d'une culture, on a toujours intérêt à démarrer aussi concentré que possible en spiruline, c'est pourquoi on démarre avec le niveau minimum de liquide si la disponibilité de semence est limitée. Si la culture commençante est trop diluée (Secchi supérieur à 5cm), Il faut ombrer, si non on risque la morte des spirulines par photoxydation au soleil. Il faut veiller à éviter les dépôts minéraux qui entraînent avec eux des spirulines (pour cela filtrer au besoin le milieu avant de l'ensemencer et maintenir l'agitation pendant la nuit si possible) Si le niveau initial est le niveau normal, et si le milieu est à base de bicarbonate, ne pas ensemencer trop concentré non plus. (JOURDAN, 1999)



Le disque de Secchi est un instrument constitué d'une baguette mesurant 30 cm de long, graduée en centimètres. A son extrémité est fixé un disque blanc de diamètre compris entre 30 et 40 mm.

Figure n °3 : Représentation disque de Secchi

II.1.6. La récolte

On récolte de manière à maintenir la concentration en spirulines au niveau désiré, entre 0,4 et 0,6 g/l, pas forcément tous les jours. Si le milieu est trouble, corriger la mesure de concentration sinon risque de surexploitation et par conséquent de suralimentation et d'intoxication par l'urée. En l'absence de récoltes, avec suffisamment de nutriments, la concentration en spiruline croit jusqu'à l'équilibre entre photosynthèse et respiration, correspondant à environ 250 g de spiruline/m² de bassin. Il n'est pas bon pour la culture de rester longtemps sans être récoltée, à très haute concentration : cela peut même être une cause de mortalité pour elle. Inversement, il n'est pas bon d'abaisser la concentration en dessous de 0,4 g/l, en tous cas de 0,3 g/l : la productivité est plus forte aux basses concentrations mais la culture y est moins stable, et la spiruline produite une teneur en phycocyanine moins élevée (JOURDAN, 1997).

Les prélèvements doivent être soigneusement ajustés, pour ne pas affaiblir la population en place, qui doit continuer à se reproduire (exponentiellement) à l'optimum de la surface du bassin la nourriture en éléments minéraux doit être raisonnée sur les mêmes critères

Le bac de filtration récupère l'algue retenue par un cadre pourvu d'un tamis de 50 micron. (CLEMENT, 2006).

II.1.7. Le séchage

Le séchage est le seul moyen qui peut assurer une bonne conservation de la spiruline sans chaîne de froid. On peut faire un séchage à l'ombre simplement dans un courant d'air à température ambiante, sous moustiquaire (il suffit que l'air soit à température nettement supérieure à son point de rosée) (JOURDAN, 1999). Si après la récolte, la spiruline n'est pas séchée ou congelée, fermentent rapidement, attaquées par les bactéries qui les accompagnent en quelques heures.

Il y a plusieurs méthodes de séchage, mais n'oubliez pas qu'il s'agit de transférer l'eau dans l'air et que ce n'est pas nécessairement par la chaleur la plus utilisée :

- Le séchage par atomisation le même procédé que le lait poudre.
- Le séchage au tambour consiste à faire passer la pâte d'algues essorée entre deux cylindres chauffés ;
- Le séchage par lyophilisation donne un produit de haute qualité, sans le dégrader ;
- Le séchage solaire est le plus avantageux (FOX, 1999).

II.1.8. Conditionnement

Il est important d'insister sur le fait que les qualités nutritionnelles de la spiruline sont préservées à partir du moment où elle n'est pas cuite et que ses conditions de conservation sont respectées :

- la spiruline fraîche (biomasse pressée mais non lavée) est la forme optimale sur le plan qualitatif, mais elle ne se conserve que 6 heures au maximum à température ambiante, ou 2 à 3 jours à 4°C.
- la spiruline réduite en poudre, séchée et conditionnée dans un emballage bien fermé, à l'abri de l'humidité et de la lumière, conserve ses qualités nutritives d'avant séchage, pendant 5 ans. (DOUMENGE *et al*, 1993 ; JOURDAN, 2007).

Les paramètres influençant la qualité du produit sec, en terme de contenu nutritionnel, prennent en compte quatre paramètres :

- Type de séchage (filaments intacts ou filaments brisés)
- Taux d'humidité résiduel (maximum 8 %)
- Protection contre la lumière
- Protection contre l'oxygène

La spiruline sèche présente un phénomène de bleuissement après une forte exposition à la lumière : en effet, la chlorophylle est assez vite détruite par des réactions photochimiques et la couleur bleue de la phycocyanine apparaît alors comme dominante.

L'action combinée de la lumière et de l'oxygène est des plus dommageables : il est donc important de la conserver dans un conditionnement opaque et hermétique. Dans ces conditions, la spiruline séchée ne perd que très peu de sa valeur nutritionnelle, même après 4 ans de stockage (*BELAY, 1997*).

Au moment de la production de spirulines, ce sont les procédés de séchage qui risquent le plus d'altérer les vitamines qu'elle renferme.

II.2. Extraits de spiruline

Un extrait liquide de Spiruline fraîche titrée en phycocyanine a été mis au point par la société Alpha Biotech (*JAOUEN et al. 1999*). Son usage est autorisé en Europe.

La phycocyanine extraite de la spiruline est vendue entre autres comme enzyme.

Des extraits de spiruline sont commercialisés en combinaison avec des extraits d'algues vertes, pour leurs vertus cicatrisantes, antiseptiques et régénératrices cellulaires.

La commercialisation porte soit sur l'extrait brut actif stabilisé, soit sur le produit fini (gels, shampooings, laits). Les marchés concernés sont ceux :

- 1) des produits cosmétiques de soin
- 2) de la parapharmacie pour le traitement de problèmes dermatologiques
- 3) des soins vétérinaires

II.3. Différentes formes de spiruline

La spiruline se présente comme une poudre, verte foncée, avec une très légère odeur.

On peut la trouver sous différentes formes : en poudre ou sous forme de comprimés.

II.3.1. Poudre de spiruline:

La spiruline séchée se présente sous la forme d'une poudre de couleur vert foncé ; sa granulométrie est fine puisque le diamètre des particules est compris entre 9 et 25 μm . (FOX D. et R, 1999).

La spiruline en poudre s'utilise pour assaisonner les sauces à salade, les soupes ou la sauce tomate pour les pâtes, elle est additionnée aux farines de sevrage (DARCAS, 2000).

L'industrie alimentaire propose, à l'heure actuelle, de nombreux produits enrichis en spiruline : tagliatelles, soupes instantanées, gelées, pâte à tartiner, barres énergétiques, crèmes glacées, desserts chocolatés, gâteaux, boissons fermentées, yaourts, bonbons, aliments diététiques pour régimes hyperprotéiné. (HENRIKSON ;1989)

II.3.2. Comprimés

La poudre de spiruline est aussi disponible en comprimés et en gélules. Les comprimés contiennent en général 500 mg de poudre; les gélules 400 mg. Le conditionnement de la spiruline en comprimés ne nécessitant aucune adjonction de sucre, stabilisant, colorant, etc., les comprimés devraient être constitués à 100 % de spiruline.

Si c'est le cas, les comprimés ont une belle couleur vert foncé uniforme, sans petits points ou tâches de couleur différentes.

II.3.3. Extrait de phycocyanine.

Alpha Biotech a mis au point le premier extrait liquide de spiruline titré en Phycocyanine et possède un savoir-faire unique dans l'extraction et la concentration de ce pigment. Ces process ont fait l'objet d'un dépôt de brevet et d'une publication : "Clarification and concentration with membrane technology of a Phycocyanin solution extracted from *Spirulina Platensis*". (*Biotechnology Techniques* 13, 877-881, 1999.

Outre la Phycocyanine, l'extrait contient une partie de la fraction hydrosoluble de la spiruline : des protéines, des acides aminés, des enzymes, des sucres, des vitamines hydrosolubles, des sels minéraux.

Il est nécessaire que l'extrait de Spiruline soit sous forme aqueuse pour assurer une biodisponibilité totale des molécules de phycocyanine. L'extraction à basse température de manière délicate et naturelle de ce pigment permet de préserver et de concentrer les molécules

actives contrairement à un extrait sec de Spiruline où les protéines sont dénaturées par la chaleur. La fabrication avec séchage réduit de 50 fois l'activité de la phycocyanine. Pour comparaison, 10 ml de phycocyanine équivalent à 26 comprimés de spiruline (ANONYME, 2014).

II.4. Utilisation et consommation

La très grande richesse de la composition chimique de la Spiruline lui confère un large potentiel d'utilisations. Outre dans le domaine de l'alimentation, elle est utilisée dans des domaines variés.

Le marché de la Spiruline se développe avec une utilisation chez l'homme, chez l'animal et sous forme d'extrait comme la phycocyanine.

II.4.1. Spiruline à usage humain

II.4.1.1. Pour la santé

Dans les pays développés, et depuis peu dans quelques régions d'Afrique, la Spiruline est consommée comme complément alimentaire « bénéfique à la santé ». Elle est vendue dans le secteur des produits dits « Bio ». Diverses utilisations sont proposées par les négociants, avec des arguments basés sur la composition de cet organisme et les études sur les activités de ses composants. Nous présentons ci-dessous certaines utilisations. La Spiruline n'est pas un médicament, donc pas soumise à l'obligation de test d'efficacité.

II.4.1.2. Commercialisation de la Spiruline

- Pour une alimentation équilibrée : par ses apports en micronutriments.
- Dans les régimes amaigrissants : pour ses taux importants en protéines et en phénylalanine, qui régularisent l'appétit (PARIKH *et al.* 2001).
- Pour l'amélioration des capacités sportives : par ses teneurs en fer, en vitamine B12, et en β -carotène qui faciliteraient la récupération (PARIKH *et al.* 2001).
- Pour lutter contre l'asthénie par son apport en oligoéléments et vitamines.
- Pour ses effets sur la sénescence : par les propriétés antioxydantes du β -carotène, de la phycocyanine et de la vitamine E, elle serait un frein au vieillissement des cellules.
- Pour son activité antioxydante liée à la phycocyanine (PARIKH *et al.* 2001).

- Pour son activité anticoagulante liée au *Spirulane Calcique (Sp-Ca)* et au *SpirulaneSodique (Sp-Na)*(*PARIKH et al. 2001*).
- Pour renforcer le système immunitaire grâce aux polysaccharides (*PARIKH et al. 2001*).
- Pour son activité antivirale : liée au sulfoquinovosyldiacylglycerol riche en sulfolipides(*PARIKH et al. 2001*).
- Pour son activité antitumorale liée à la phycocyanine(*PARIKH et al. 2001*).
- Pour son activité pour diminuer le cholestérol grâce aux acides gras polyinsaturésoméga-3 et oméga-6(*PARIKH et al. 2001*).
- Pour ses autres actions sur la santé : une diminution du diabète chez l'homme(*PARIKH et al. 2001*).
- une activité anti-inflammatoire sur les articulations(*REMIREZ et al. 2002*).
- une hépato protection ; un effet possible de lamolécule *Spirulane-sodique* dans la prévention de l'athérosclérose (*YAMAMOTO et al.,2006*).

II.4.1.3. Autres utilisations

Le groupe des cyanobactéries produit une variété de métabolites secondaires dans leurmilieu de culture (*HARRIGAN & GOETZ 2002*).Beaucoup de ces produits naturels ont desactivités antibiotique, algicide, antiviral, fongicide(*HARRIGAN et al. 1999 ; JAKI et al. 1999;MUNDT et al. 2001*).

En cosmétique, la Spiruline est utilisée dans les masques cryogéniques et crèmes anti-âge,par son action sur le renouvellement cellulaire et la tonicité des tissus (*SPOLAORE et al 2006*).Elle est aussi utilisée en synergie avec d'autres algues, comme agent cicatrisant etantiseptique.

Dans l'agroalimentaire, elle est utilisée comme colorant naturel (la phycocyanine est un desrars pigments naturels de couleur bleue) dans les chewing gums, sorbets, sucreries,produits laitiers, boissons non alcoolisées. Elle apparaît également dans une gamme deproduits algaux mélangée à du sel, des tagliatelles etc. En Suisse et au Japon, il existedepuis longtemps du pain à la Spiruline (*SPOLAORE et al 2006*).

II.4.2. Spiruline à usage animal

La Spiruline est utilisée comme complément nutritionnel en aquariophilie, en aquaculture, en agroalimentaire, pour des effets très spécifiques :

II.4.2.1. Rôle dans la croissance et fertilité

Des études sur les poissons d'aquarium tels le *Xiphophorus helleri* (James et al. 2006) et la crevette *Fenneropenaeus chinensis* (KIM et al. 2006) ont montré les effets bénéfiques de *Spirulina platensis* en ce domaine. L'influence bénéfique sur la croissance, de l'incorporation de Spiruline dans la nourriture des poulets de chair a été présentée par (comm. coll. Tuléar 2008).

II.4.2.2. Rôle dans le renforcement de la défense immunitaire

En aquaculture, la Spiruline est ajoutée aux granulés dans la nourriture des poissons d'élevage, plus souvent soumis à des infections virales et/ou bactériennes que les poissons sauvages. (WATANUKI et al. 2006) ont mis en évidence l'effet immunostimulant de *Spirulina platensis* chez la carpe *Cyprinus carpio*. Des vétérinaires préconisent l'administration de Spiruline à des animaux domestiques.

II.4.2.3. Augmentation des pigmentations

La Spiruline est utilisée pour ses pigments :

- En aquariophilie pour accentuer la coloration des poissons d'ornement (James et al. 2006).
- En aquaculture pour améliorer la pigmentation des crevettes et des poissons (REGUNATHAN & WESLEY 2006).
- En agroalimentaire pour rendre les oeufs et la chair de poulet plus attrayants au consommateur par les caroténoïdes qu'elle contient (CIFERRI 1983 ; HENRIKSON 1994 ; TOYOMIZU et al. 2001).

II.4.2.4. Amélioration des performances des animaux

Elle est vendue comme additif à la nutrition des taureaux reproducteurs, des chevaux de course.

II.5. Intérêt de la spiruline

La spiruline n'est pas un médicament. C'est un aliment qui nourrit et soigne en même temps (comme tout aliment digne de ce nom), un " aliment santé ou alicament" de part sa composition exceptionnelle, la spiruline peut aider dans de nombreux cas :

❖ Spiruline et maladies cardio-vasculaires

Les maladies cardio-vasculaires sont la première cause de mortalité. L'encrassement par le cholestérol en est la cause, conséquence de nos habitudes alimentaires parfois excessives, certains aliments nous en protègent. Par exemple, la pomme, riche en pectine permet la fixation et l'élimination du cholestérol. La spiruline par sa richesse en chlorophylle, en acides gras insaturés et en fibres se révèle capable de faire baisser le taux de cholestérol sanguin (Earth Newsletter, année).

❖ Spiruline et cancer

De nombreuses études ont montré l'effet protecteur du beta-carotène sur certains cancers (*MLENKES et al, 1986*). Rappelons que la spiruline en contient 15- fois plus que les carottes. La chlorophylle qui réoxygène les cellules et la phycocyanine s'avèrent aussi avoir un effet protecteur contre le cancer (*HENRIKSON, 1989*). Certains industriels extraient la phycocyanine de la spiruline pour en faire un médicament. La prise régulière de spiruline peut aider à réduire les effets négatifs liés aux chimiothérapies.

❖ Spiruline et SIDA

Le SIDA est une baisse d'immunité qui favorise les infections. La spiruline par son pouvoir stimulant sur le système immunitaire semble montrer des effets positifs sur les maladies liées à une immunodéficience. Des chercheurs américains du National Cancer Institut écrivent à propos d'une sulfolipide contenue dans la spiruline : «un effet remarquablement actif contre le virus HIV du SIDA ».

❖ Spiruline et anémie

L'anémie (diminution du nombre de globules rouges) est directement liée au manque de fer. Or la carence en fer est la plus répandue dans le monde au point qu'elle représente un problème de santé public. Les enfants, les femmes et les personnes âgées sont particulièrement touchés. Les pilules de fer sont très mal absorbées par l'organisme. La très haute teneur en fer de la spiruline associée à sa haute biodisponibilité en fait.

❖ Spiruline et les 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.

❖ Spiruline et les sportifs

De nombreux sportifs de haut niveau utilisent la spiruline pour améliorer leurs performances, sous le suivi de médecins et de préparateurs physiques.

❖ Spiruline et régimes

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.

❖ 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.

❖ Spiruline et malnutrition

En Afrique, en Asie, et en Amérique du Sud, de nombreuses expériences ont démontré l'efficacité impressionnante de la consommation quotidienne de 10g de spiruline pendant trois mois dans des cas de malnutrition aiguë.

II.5.1. Autres intérêts

- Effets contre la toxicité des reins.
- Effets sur la flore intestinale.
- Activité antivirale.
- Effet antioxydant (*CHRISTOPHE GA, 2007*).

- Diminution de diabète chez l'homme (*PARIKH et al , 2001*).
- En cosmétique, la spiruline est utilisée dans les masques cryogénique et crèmes anti-âge (*SPOLAORE et al , 2006*).

II.6. Toxicité de la spiruline

Les cyanotoxines ne seraient pas présentes dans la Spiruline. Il existe aujourd'hui des méthodes de détection des gènes impliqués dans la synthèse des microcystines, qui sont des cyanotoxines présentes dans les cyanobactéries (*SAKER et al. 2007*).

La Spiruline accumule des métaux lourds mais en quantité en dessous des seuils de toxicité donnés par la FAO (*FALQUET ET HURNI, 2006*). Cependant les mêmes auteurs recommandent des contrôles de teneurs en métaux lourds pour la Spiruline destinée à l'alimentation humaine.

Le pH élevé du milieu de culture empêche la prolifération d'autres espèces et de bactéries pathogènes (*LOÏC et al, 2008*).

III.1. Le cholestérol

Le cholestérol, comme les triglycérides, et les autres lipides (esters de cholestérol, et phospholipides) ne sont pas hydrosolubles, ils sont par conséquent insolubles dans les milieux biologiques. De ce fait, le transport des lipides dans le plasma et la lymphe est assuré par des complexes macromoléculaires hydrosolubles composés de divers lipides et protéines : les lipoprotéines (THOMAS ;2007).

Le cholestérol est essentiel pour le fonctionnement de la cellule. Cependant son excès est dangereux; c'est un facteur de risque dans les maladies cardiovasculaires.

III.1.1. Définition et structure de cholestérol

Le cholestérol est le stérol le plus courant dans les membranes (MURRAY and GRANNER, 2008). C'est un constituant majeur des membranes plasmiques animales et se trouve en moindre quantité dans les membranes des organites subcellulaires. Selon différentes estimations, 80 à 90% du cholestérol cellulaire total seraient présents dans la membrane plasmique alors que le réticulum endoplasmique et les membranes mitochondriales internes en contiennent de très faibles quantités (MUKHERJEE et al., 1998). Bien que les proportions relatives varient selon les espèces et les types cellulaires chez les vertébrés, le cholestérol constituerait 30 à 40 mol% du total des lipides de la membrane plasmique contre 40-60 mol% pour les glycérophospholipides et 10-20 mol% pour les sphingolipides (MCMULLEN et al., 2004). Un léger caractère amphiphile est conféré au cholestérol par son groupe hydroxyle alors que sa structure cyclique fusionnée lui confère une rigidité supérieure à celle des autres lipides membranaires (Figure 04). Il a donc une incidence importante sur les propriétés des membranes (VOET and VOET, 1998).

Le cholestérol ($C_{27}H_{45}OH$) est un lipide de la famille des stérols, il joue un rôle capital dans de nombreux processus biochimiques et il est le précurseur des hormones stéroïdes et il est donc utilisé par les organes ou tissus qui les synthétisent (KING.2000).

Il est également indispensable à la fabrication des hormones produites par les glandes génitales et surrénales (ROSSANT, LAMBROSO. 2002). Il est aussi le précurseur d'acides biliaires et de la vitamine D.

La molécule de cholestérol est un stérol comprenant quatre cycles carbonés notés A, B, C, D (noyau cyclo-pentanophénanthrénique). 8 carbones asymétriques (les carbones 3, 8, 9,

L'idéal est donc d'avoir un taux de LDL plutôt bas : de 1,30 à 1,60. g/l.

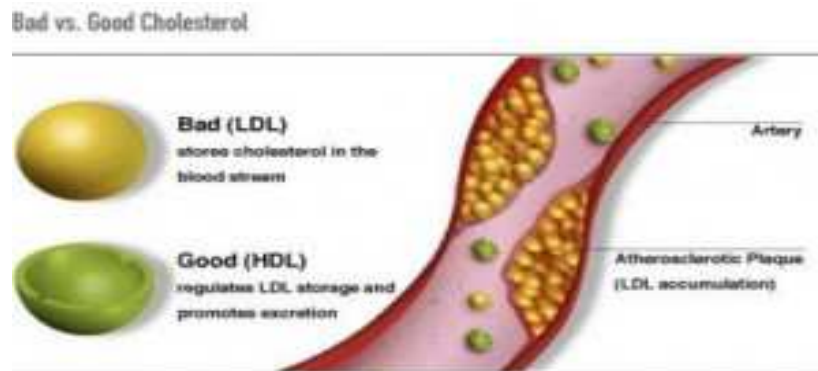


Figure 05 : Transporteurs du cholestérol et athérosclérose.

- **Moins les lipoprotéines contiennent de lipides**, et donc plus de protéines, plus elles sont denses : ce sont les lipoprotéines de haute densité (HDL « high-densitylipoprotein ») = le « bon » cholestérol.

Elles font le trajet inverse des LDL, et se déplacent donc des tissus périphériques vers le foie pour être dégradées. L'idéal est donc d'avoir un taux de HDL plutôt haut : supérieur à 0,60 g/l(*LA SPIRULINE.10/2013*).

III.1.3. Taux de cholestérol dans le sang

Il est possible d'établir le taux "normal" de cholestérol dans le sang : le cholestérol total et le cholestérol sous sa forme combinée car associé à des protéines dites de faibles (LDL) et hautes densités (HDL).

Tableau 5 : Taux de cholestérol

Cholestérol total <i>pour une personne sans facteur de risque</i>	inférieur ou égal à 2,30 g/l
Cholestérol HDL	supérieur ou égal à 0,55 g/l
Cholestérol LDL <i>pour une personne sans facteur de risque</i>	inférieur ou égal à 1,50 g/l

Certains médecins préfèrent demander un dosage spécifique du LDL et du HDL, le résultat de ce dosage se traduisant par le rapport suivant : (cholestérol total / HDL) inférieur ou égal à 4,5. Plus le rapport est élevé, plus le risque cardio-vasculaire est grand.

L'élévation du taux de cholestérol sanguin (hypercholestérolémie) est très souvent le résultat d'une mauvaise hygiène de vie. Dans certains cas isolés, d'autres causes (predisposition, diabète, troubles organiques) peuvent également jouer un certain rôle. Il faut signaler également l'existence d'hypercholestérolémies essentielles qui sont souvent héréditaires.

III.1.3.1. Hypercholestérolémie.

L'hypercholestérolémie constitue un important fléau pour la santé humaine (PN MAI 2013). L'excès du cholestérol dans le sang est une menace, en effet il peut être à l'origine de maladies cardiovasculaires aux conséquences parfois graves, comme les infarctus du myocarde ou les accidents vasculaires cérébraux.

III.1.3.2. Causes de l'hypercholestérolémie.

Le cholestérol a deux origines, il est soit ingéré dans le bol alimentaire et absorbé au niveau de l'intestin, soit néo-synthétisé par les hépatocytes et les cellules périphériques. Sa seule voie de sortie de l'organisme se fait par l'excrétion hépato-biliaire car la majorité des tissus périphériques est incapable de le dégrader localement. Le foie est donc le principal organe de dégradation du cholestérol. A son niveau, le cholestérol peut être soit transformé en acide biliaire, soit être directement excrété dans la lumière de l'intestin.

Les mauvaises habitudes alimentaires en premier lieu (excès d'acides gras saturés notamment), mais aussi le stress, les prédispositions génétiques, certaines maladies (maladies rénales, hypothyroïdie), la prise de certains médicaments favorisent l'augmentation du taux de cholestérol dans le sang. En outre le tabagisme, la consommation d'alcool, l'hypertension, le diabète, le surpoids, la sédentarité sont des facteurs qui, associés à l'excès de cholestérol, augmentent de façon exponentielle les risques cardiovasculaires(HELENE HURET.2013).

Le Cholestérol et le peuvent être liés : La surcharge pondérale qui se loge de préférence dans les parties hautes du corps (cou, ceinture scapulaire, abdomen) s'accompagne très souvent de nombreuses anomalies : hypertension, diabète de type 2, augmentation des triglycérides et hypercholestérolémie. Une perte de poids même modérée améliore la santé des personnes dont l'indice de masse corporelle (IMC) est supérieur à la normale (HELENE HURET, 2013).

III.1.3.3. Comment faire baisser le taux de cholestérol ?

Pour réduire son taux de cholestérol, il n'y a pas de mystère il faut d'abord changer ses habitudes alimentaires. Tous les aliments gras ne sont pas à proscrire. Il faut éviter les apports excessifs en graisses saturées et privilégier les apports de matières grasses dites "insaturées" dans l'alimentation(HELENE HURET.2013).

Aussi, dans un régime anti-cholestérol, on peut adapter les fruits et les légumes qui rassasient tout en apportant des micronutriments - vitamines, minéraux, oligo-éléments, fibres - essentiels à l'organisme. Ils contiennent notamment des antioxydants, qui préviennent l'oxydation du cholestérol et évitent la formation de plaques dans les artères. Associée à une diminution des graisses saturées, la consommation de fruits et de légumes protège la santé cardio-vasculaire.(HELENE HURET.2013)

Les mesures diététiques ont un réel impact sur la santé. Un régime bien suivi permet d'abaisser jusqu'à 8 % le taux de cholestérol-LDL. (HELENE HURET.2013)

Ce type de régime est basé avant tout sur la diminution des acides gras saturés de l'alimentation au profit des acides gras poly-insaturés et par ailleurs sur une augmentation de la consommation de fruits de légumes, de céréales (complètes de préférence) et de l'activité physique. . (HELENE HURET.2013)

Régime anti-cholestérol vise essentiellement à rectifier quelques erreurs nutritionnelles et d'adopter de nouvelles habitudes alimentaires. Il faut limiter l'excès d'aliments riches en

graisses saturées et augmenter sa consommation de légumes (tomate), de céréales, de fruits (pommes). Par ailleurs de nombreux produits anti-cholestérol ont fait leur entrée sur les marchés . (HELENE HURET.2013)

La quantité de cholestérol consommée varie en fonction des aliments et de leur quantité. Les aliments qui favorisent le cholestérol sont les viandes, les fromages, les abats, les œufs, le beurre... bref, tous les aliments qui contiennent des graisses surtout animales, cachées ou visibles. Leurs apports en cholestérol peuvent varier de 0,3 g/l – s'il y en a peu au cours du repas – à 1,5 ou 2g/l – s'il y en a beaucoup -, auxquels il faut ajouter 1 à 2 g provenant des sels biliaires(LA SPIRULINE.10 /2012)

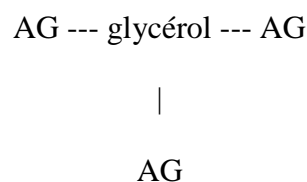
III.2. Les triglycérides.

Les triglycérides, partie des lipides, constituent une source d'énergie les triglycérides circulant proviennent de 2 sources :

- L'intestin qui absorbe les graisses alimentaire, surtout constituée de triglycérides ;
- Le foie qui synthétise des triglycérides, à partir des nutriments absorbés en période postprandiale et à partir des lipides de réserve en période de jeune.

III.2.1. Structure.

Le triglycéride est formé par la liaison de trois acides gras (AG) et de glycérolprovenant du glucose :



- La qualité du triglycéride est fonction du type d'acides gras, saturés ou non ;

Quand on consomme des graisses, les acides gras absorbés sont utilisés par les tissus et une partie est captée par le foie. Le foie synthétise les triglycérides endogènes formés à partir des A.G. provenant surtout du métabolisme glucidique (fructose notamment) en association avec le glycérol.(LA SPIRULINE.10 /2012)

III.2.2. Triglycéridémie.

Les valeurs usuelles de la triglycéridémie sont comprises entre 0,50 et 1,70 mmol/l (0,45-1,50g/l), au-delà, il y a une hypertriglycéridémie.

Comme pour le cholestérol l'influence du régime alimentaire sur la triglycéridémie est importante. Les acides gras polyinsaturés de la série ω_3 , abondants dans les poissons gras diminuent la triglycéridémie (et la cholestérolémie), par le biais d'une diminution de la synthèse hépatique de VLDL. Si le régime alimentaire est pauvre en graisses et riche en hydrates de carbone, les concentrations de triglycérides et VLDL augmentent à la fois chez les sujets normolipidémiques et chez les hypertriglycéridémiques car le foie synthétise davantage de VLDL, et celle-ci sont plus riches en triglycérides que les VLDL normales.

Le rôle athérogène des triglycérides semble indirect :

- L'augmentation de leur concentration plasmatique est le plus souvent associée à une diminution de celle des HDL anti-athérogènes.
- L'hypertriglycéridémie est associée à des effets délétères non athérogènes mais suspectés d'intervenir dans la pathogène des maladies cardiovasculaires (GUIMONT; 1998)

III.3. Traitements du cholestérolémie et triglycéridémie

- Des régimes diététiques adaptés afin de normaliser l'hyperlipémie. Un régime enrichi en graisses saturées élève la cholestérolémie et le taux des lipoprotéines LDL, alors qu'un régime enrichi en graisses polyinsaturées réduit ces paramètres.
- Des médicaments hypocholestérolémiants ou hypotriglycéridémiants.

Il existe deux catégories de médicaments :

- ✓ Les **fibrates** dits de deuxième génération qui ont un fort effet sur les élévations combinées du cholestérol et des triglycérides (particulièrement utiles chez les diabétiques) ;
- ✓ Les **statines** qui ont un très fort effet d'abaissement du LDL cholestérol, alors qu'elles abaissent peu les triglycérides et élèvent modérément le bon cholestérol.

Ces traitements sont importants car ils constituent un volet essentiel de la prise en charge correcte des diabétiques. En effet, beaucoup de diabétiques ont un taux de "mauvais cholestérol" trop élevé.

CONCLUSION

La caractérisation physico-chimique des deux souches spirulines : *Arthrospira fusiformis* de l'Algérie et *Arthrospira platensis* du Cameroun montre que ces dernières présentent presque la même composition mis-à-part la teneur en protéines.

En effet, nous avons trouvé que la spiruline de Tamanrasset *A. fusiformis* présente un taux de protéine de l'ordre de 60.16 g/100 g de spiruline ± 7.73 alors que ce taux s'abaisse à 36.09 g/100 g ± 4.64 dans la spiruline de Nomayos : *A. platensis*. Cela peut être due au fait que les deux souches sont cultivées sur deux milieux différents.

Différentes extractions ont été réalisées, les différents extraits présentaient la coloration du composé qu'on cherche à l'extraire. Les deux extraits de phycocyanine présentaient une belle coloration bleue : La spiruline de l'Algérie a présenté une coloration légèrement claire par rapport à celle du Cameroun ; le taux de phycocyanine légèrement élevé chez cette dernière peut être en cause : 180,39 mg/g de matière sèche contre 172,45 \pm 0.05 mg/g de MS.

L'étude, *in vitro*, montrent qu'il y'a une dégradation importante du cholestérol par toutes les combinaisons testées. Toutefois, La spiruline à l'état brut assure le meilleur effet hypocholestérolémiant. Les extraits de polyphénols semblent avoir plus d'effet que ceux de la phycocyanine et des polysaccharides.

D'après les résultats obtenus de l'effet sur le taux des triglycérides, menée *in vitro*, il est constaté que l'effet hypotriglycéridémiant est plus marqué par les extraits de polyphénols et de phycocyanine avec des diminutions jusqu'à 91.45% du taux des triglycérides pour les polyphénols de *A. platensis* et la phycocyanine dans le glycérol de *A. fusiformis*.

Les extraits des polyphénols et de phycocyanine semblent avoir un effet sur les triglycérides plus intense que la spiruline en état.

Notre travail engendre d'autres investigations pourraient être engagées, entre autres :

- Etude comparative entre les deux spirulines cultivées sur un même milieu de culture ;
- La réalisation d'autres extraits pour l'étude de ces deux effets ainsi que l'application *in vivo* ;
- Des essais d'introduction de la spiruline dans le régime alimentaire algérien.

Chapitre V. Résultats et discussions

V.1. Analyse de la composition physico-chimique des deux souches des spirulines

Les résultats relatifs à la caractérisation physico-chimique des deux souches de spiruline, sont représentés dans le tableau 09 et illustrés par la figure 08.

Tableau 09 : Composition bromatologique générale des deux souches de spiruline:

Composant	Moyenne \pm écart-type	
	Spiruline A	Spiruline C
Taux d'humidité (%)	5,57 \pm 1.40	3,67 \pm 1.20
Taux de cendres (%)	14,15 \pm 0.49	10,57 \pm 0.2
Taux de matière grasse (%)	03.53 \pm 0.18	02.78 \pm 1.10
Taux de protéines (g/100g=%)	60.16 \pm 7.73	36.09 \pm 4.64

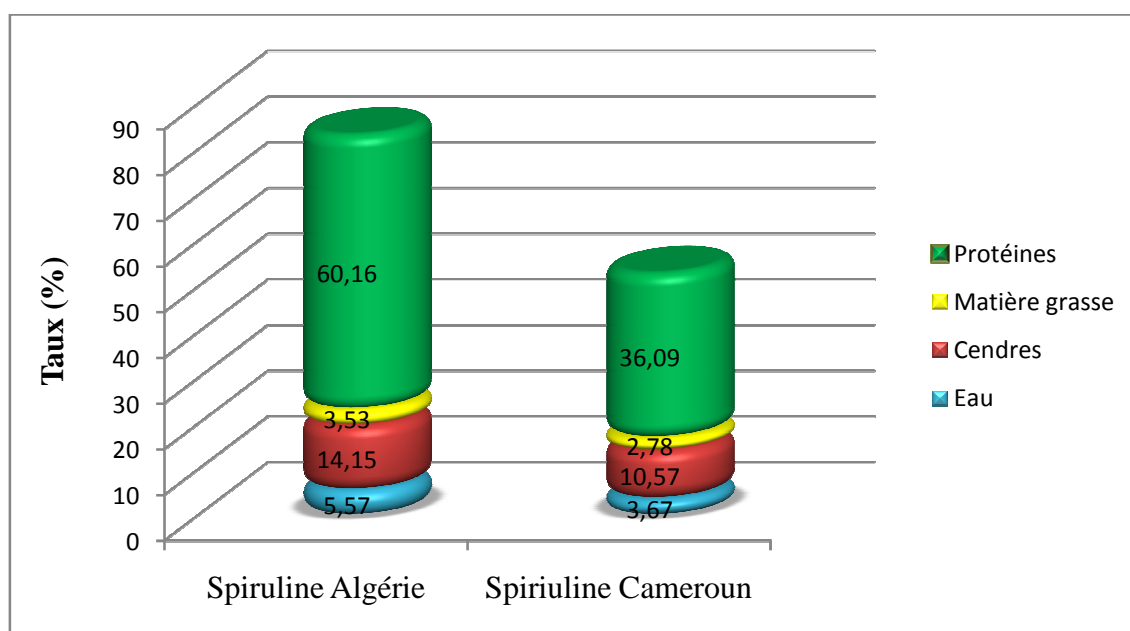


Figure 08 : Composition bromatologique générale (en pourcentage de masse) des deux souches de spiruline.

Il en ressort de l'analyse du tableau 08 et de la figure 21 que le taux d'humidité de la poudre de spiruline est de l'ordre de $5,56\% \pm 1,40$ pour la spiruline Algérienne –*Fusiformis*– (S_A) et il est de $3,66\% \pm 1,20$ pour la spiruline Camerounaise –*Platensis*– (S_C) qui présente donc le taux le plus faible.

Nos résultats semblent être inférieurs par rapport au taux d'humidité de la poudre de spiruline (S_A), trouvé par LOUNICI (2010) qui va de 8.64% à 13.62%.

Les deux souches des spirulines (S_A) et (S_C), présentent en effet un taux qui est dit : « dans les normes ». ESPIRARD, 2002 préconise pour les poudres un taux d'humidité allant de 4 à 6%. Entre les deux spirulines, on note une légère augmentation dans la spiruline Algérienne. Cette augmentation de la teneur en eau peut être due à un séchage insuffisant, une poudre avec un tel taux d'humidité élevé risque de s'agglomérer (ESPIRARD, 2002). Aussi, la répercussion sur le stockage de la spiruline en poudre serait à considérer (OLIVEIRA et al., 2009).

La teneur en cendres de la spiruline de Dr Hiri (S_A) est de l'ordre de $14,15\% \pm 0,49$ alors que celle de la spiruline de Nomayos (S_C) en contient à $10,57\% \pm 0,2$. Ces teneurs sont légèrement supérieures à celle de la spiruline de Madagascar : 9.8% (RAZAFINDRA et al. 19...).

La teneur en matière grasse a révélé un taux de $3,53\% \pm 0,18$ dans *Arthrospira fusiformis* (S_A) et de $2,78\% \pm 1,10$ pour *Arthrospira Platensis* (S_C) ; ces valeurs semblent être inférieures aux valeurs données par la bibliographie et qui varient de 5.6 à 7% (HUDSON et KARIS, 1947 ; BUJARD et al., 1970 ; PROTEUS, 1975 ; CHALLEM et al., 1981 ; DILLON et al., 1993 ; COHEN, 1997 ; YOUENNE, 2004).

Les taux de protéines enregistrés sont de $60.16\% \pm 7.73$ pour la Spiruline (S_A) et de $36.09\% \pm 4.64$ pour la spiruline (S_C).

Il semble que la spiruline du Cameroun présente un très faible taux de protéines comparativement à la spiruline de l'Algérie et aux taux donnés par la littérature : La spiruline (S_A) présente une teneur en protéines qui semble être proche de celle de la spiruline de Madagascar 59.3%. Notons aussi que cette teneur en protéine dépasse toutes les sources de protéines alimentaires connues : levure de bière (38.8%), lait écrémé en poudre (35.9%), viandes séchées salées (34.3%), graines de soja séchées (34.1%) (RAZAFINDRA et al., 19--).

La variation dans le taux de protéines est attribuée en grande partie à la composition du milieu de culture : en effet, ce taux est élevé dans un milieu riche en soufre (SO₂) qui est nécessaire pour la synthèse de protéines (VAN RIJN et SHILO, 1986).

Toutefois, le contenu en protéines varie selon le moment de la récolte, les valeurs les plus fortes étant obtenues au début de la période lumineuse (AFAA, 1982 ; FOX, 1999).

Ainsi, le mode de séchage appliqué à la spiruline et surtout la température influencent la teneur en protéines : après une éventuelle dénaturation : une diminution du taux de protéines peut être observé suite à une combinaison des protéines en réaction de Maillard (CHEFTEL et CHEFTEL, 1979 ; DESMORIEUX et HERNANDEZ, 2004 ; LOUNICI, 2010).

En se basant sur les résultats obtenus, il semblerait que *Arthrospira Platensis*(S_A) présente un avantage sur *Arthrospira Fusiformis*(S_C) du point de vue de la valeur nutritive.

V.1.1. Détermination du potentiel d'hydrogène (pH).

Les résultats du pH sont représenté par le tableau 09 .

Tablea10 :Potentiel d'hydrogène (pH) des deux spirulines.

Echantillon	<i>A. Fusiformis</i> (S _A)	<i>A. Platensis</i> (S _C)
pH (moyenne ± écart-type)	7.43±0.05	7.01±0.10

Ces résultats montrent que les deux spirulines ont un pH neutre : 7.43 et 7.01 pour l'*A. fusiformis* et l'*A. platensis* respectivement.

V.1.2. Teneur en Phycocyanine

Les résultats de la teneur en Phycocyanine sont représentés par le tableau 10 et la figure 09.

Tableau 11 :Teneur en phycocyanine des deux spirulines (% de la matière sèche).

Teneur en phycocyanine (mg/g de matière sèche)	<i>A.fusiformis</i> (SA)	<i>A.platensis</i> (SC)
moyenne± écart-type	172,45± 0.05	180,39± 25.38

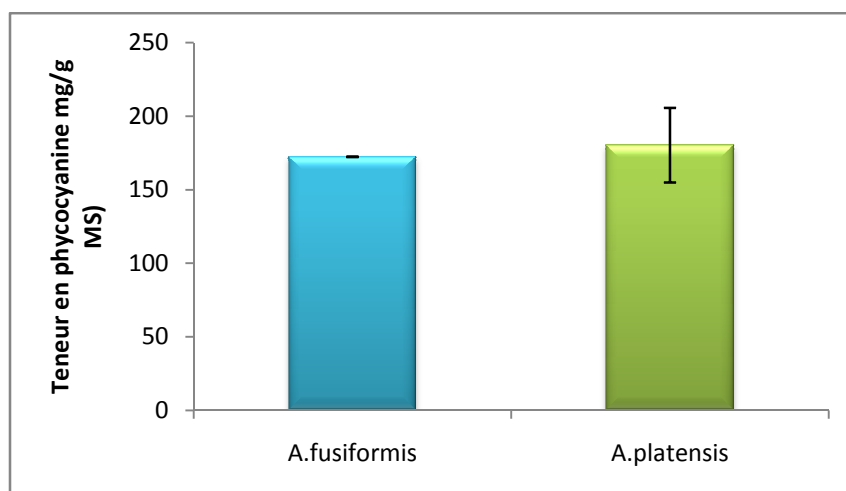


Figure 09 :Teneur en phycocyanine (mg/g de MS) des deux spirulines analysées.

La teneur en phycocyanine dans la spiruline A : l'*Arthrospira Fusiformis* est de 1.72% de MS soit 172,44 mg/g \pm 0,04 ; pour la spiruline C : l'*Arthrospira Platensis* elle est de 180,39 mg/g \pm 25,38.

Cette teneur de phycocyanine dans les deux spirulines analysées est supérieure à celle trouvée par LOUNICI, (2010) de l'ordre de 98.24 à 102,15 mg/g \pm 2,81 pour la spiruline de Tamanrasset et celle donnée dans la littérature de l'ordre de 106,4 mg/g de matière sèche (AB DEI BAKY et al 2004).

Ainsi, la composition du milieu de culture de la spiruline intervient : il semblerait que le nitrate de sodium NaNO_3 est nécessaire pour la synthèse des acides aminés, qui composent les protéines et d'autres composants cellulaires comme les chlorophylles et la phycocyanine. L'intensité lumineuse, la souche ainsi que les conditions de culture semblent avoir un effet sur la teneur en phycocyanine (AB DEI BAKY et al., 2004 ; COLLA et al., 2007).

V.2. Deuxième partie : Activités biologiques

IV.2.1. Résultats de l'effet, *in vitro*, sur le cholestérol

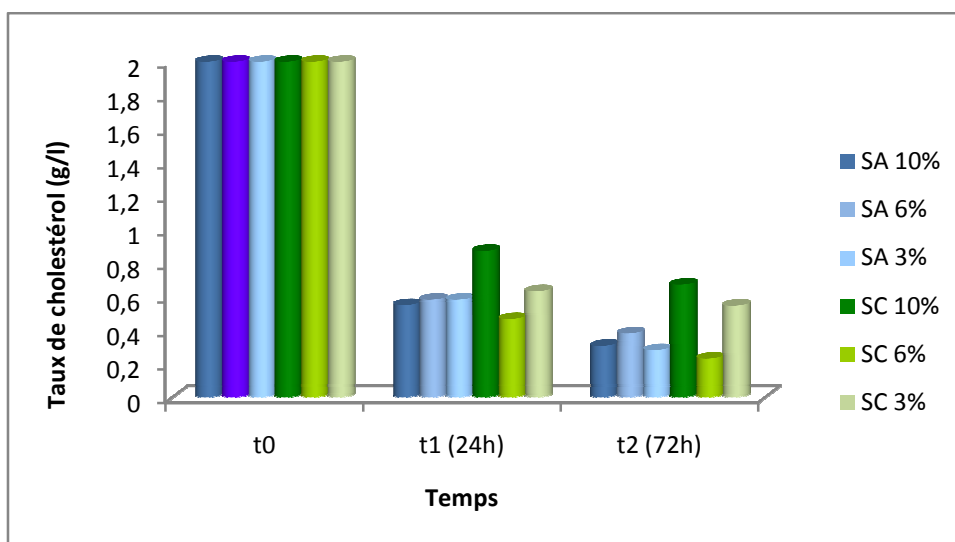
Le tableau 11 et la figure 10 et 11 illustrent les résultats de dosage du cholestérol total obtenus lors de l'étude *in vitro* à différents temps d'incubation.

Tableau 12: Résultats de l'effet hypocholestérolémiant *in vitro* des deux spirulines et des divers extraits.

Temps d'incubation	A10	A6	A3	ApE	ApG	APs	APp
t0	2	2	2	2	2	2	2
t1 (24h)	0,549	0,581	0,581	0,687	0,498	0,668	0,843
t2 (72h)	0,306	0,38	<u>0,28</u>	<u>0,479</u>	0,367	0,367	<u>0,326</u>
	C10	C6	C3	CpE	CpG	CPs	CPp
t0	2	2	2	2	2	2	2
t1	0,872	0,466	0,632	0,591	0,565	0,955	0,712
t2	0,671	<u>0,23</u>	0,546	<u>0,415</u>	0,383	<u>0,766</u>	<u>0,358</u>

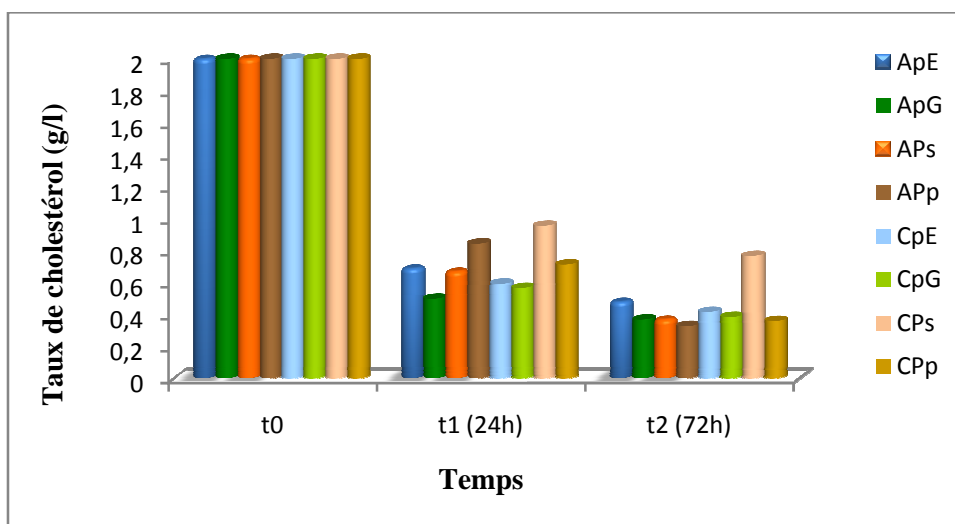
Où :

Désignation		Spiruline ou extrait
Spiruline du Cameroun	Spiruline de l'Algérie	
C10%	A10%	Spiruline à raison de 10%
C6%	A6%	Spiruline à raison de 6%
C3%	A3%	Spiruline à raison de 3%
CpE	ApE	Extrait phycocyanine eau 10%
CpG	ApG	Extrait phycocyanine eau/glycérol 10%
CPs	APs	Extrait Polysaccharides 10%
CPp	APp	Extrait polyphénols 10%



SA : *Arthrospira fusiformis* ; SC : *A. platensis* ;10%, 6% et 3% : les différentes concentrations de spiruline.

Figure 10 :Variation du taux de cholestérol dégradé à différentes concentrations des spirulines.



A : *Arthrospira fusiformis* ; C : *A. platensis* ;pE : extrait de phycocyanine dans eau ; pG : Extrait de phycocyanine dans glycérol ; Ps : Extrait de polysaccharides ; Pp : Extraits de polyphénols.

Figure 11 :Variation du taux de cholestérol dégradé par les différents extraits des deux spirulines.

Il en ressort que l'effet hypocholestérolémiant est optimal pour la spiruline à son état à partir de la concentration de 6% dans le cas d'*A. fusiformis* (SA) et à partir de la concentration de 3% dans le cas de *A. platensis* (SC) ; cette dernière présente une diminution très importante allant à 88.5% du taux de cholestérol après 72heures.

Pour ce qui est de l'effet des autres extraits de spiruline sur le taux de cholestérol, il est clair (tableau 11) que les extraits de polyphénols (à raison de 10%), ont un fort effet hypocholestérolémiant avec des diminutions du taux de cholestérol de 83.7% et 82.1% respectivement.

Ainsi les extraits de polysaccharides (*A. platensis*) et ceux de la phycocyanine (*A. platensis* et *A. fusiformis*), n'ont fait abaisser le cholestérol qu'à des valeurs de 0,766 ; 0.479 et 0.415g/l respectivement.

Les résultats obtenus montrent qu'il y'a une dégradation importante du cholestérol par toutes les combinaisons testées. Toutefois, La spiruline à l'état brut assure le meilleur effet hypocholestérolémiant. Les extraits de polyphénols semblent avoir plus d'effet que ceux de la phycocyanine et des polysaccharides.

Nos travaux sont comparables à ceux trouvés par DOUMANDJI et *al.*, (2012) qui sont de 0,24g/l après 72 heures pour la spiruline de l'Algérie à une concentration de 9%.

IV.2.2. Résultats de l'effet, *in vitro*, sur les triglycérides

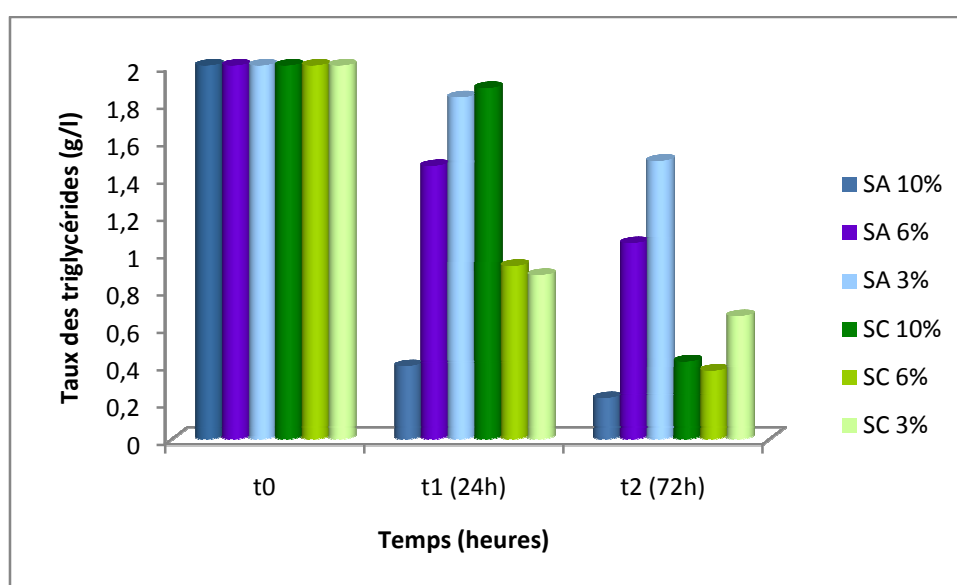
les résultats de dosage des triglycérides totaux obtenus lors de l'étude *in vitro* à différents temps d'incubation des différentes combinaisons sont regroupés dans le tableau 12 et illustrés par les figures 12 et 13.

Tableau 13: Résultats de l'effet sur les triglycérides *in vitro* des deux spirulines et des divers extraits.

Temps d'incubation	A10	A6	A3	ApE	ApG	APs	APp
t0	2	2	2	2	2	2	2
t1 (24h)	0.390	1.463	1.830	0.634	0.390	1.195	0.317
t2 (72h)	<u>0.219</u>	1.049	1.490	0.244	<u>0.171</u>	<u>0.488</u>	<u>0.146</u>
	C10	C6	C3	CpE	CpG	CPs	CPp
t0	2	2	2	2	2	2	2
t1	1.88	0.927	0.878	1.073	1.024	1.950	0.390
t2	0.415	0.366	0.658	<u>0.488</u>	0.683	<u>1.610</u>	<u>0.171</u>

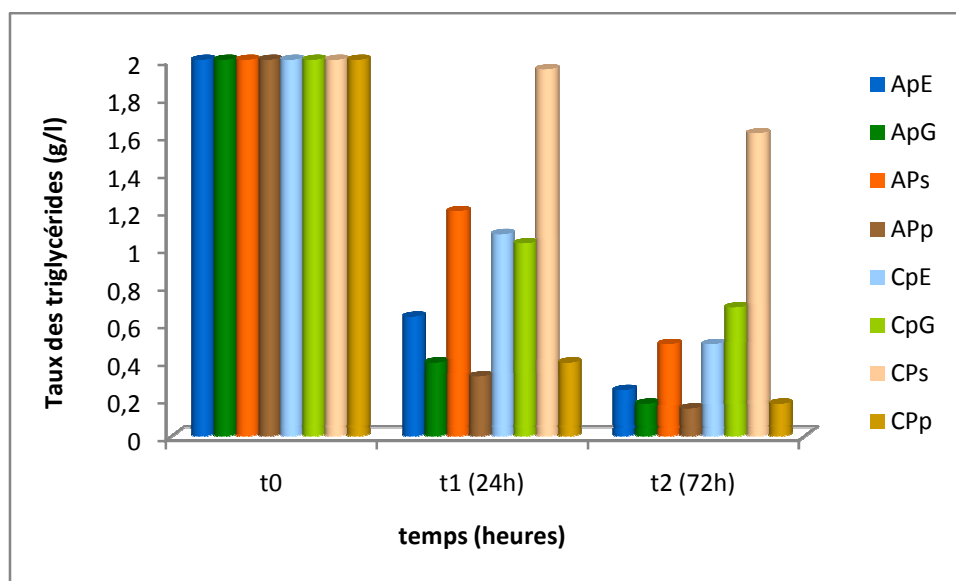
Où :

Désignation		Spiruline ou extrait
Spiruline du Cameroun	Spiruline de l'Algérie	
C10%	A10%	Spiruline à raison de 10%
C6%	A6%	Spiruline à raison de 6%
C3%	A3%	Spiruline à raison de 3%
CpE	ApE	Extrait phycocyanine eau 10%
CpG	ApG	Extrait phycocyanine eau/glycérol 10%
CPs	APs	Extrait Polysaccharides 10%
CPp	APp	Extrait polyphénols 10%



SA : *Arthrospira fusiformis* ; SC : *A. platensis* ; 10%, 6% et 3% : les différentes concentrations de spiruline.

Figure 12: Variation du taux des triglycérides dégradés à différentes concentrations des spirulines.



A : *Arthrospira fusiformis* ; C : *A. platensis* ; pE : extrait de phycocyanine dans eau ; pG : Extrait de phycocyanine dans glycérol ; Ps : Extrait de polysaccharides ; Pp : Extraits de polyphénols.

Figure 13: Variation du taux des triglycérides dégradés par les différents extraits des deux spirulines.

On remarque une diminution au cours du temps d'incubation pour toutes les combinaisons testées. Ainsi, le taux des triglycérides est diminué par la spiruline A à la concentration de 10% jusqu'à 0.219 alors que la spiruline C, présente au contraire un effet hypotriglycéridémiant même à des concentrations plus faibles de 6 et 3% correspondant respectivement à 0.366 et 0.658 g/l.

D'après les résultats de l'étude des divers extraits, sur le taux des triglycérides, menée *in vitro*, il est constaté que l'effet hypotriglycéridémiant est plus marqué par les extraits de polyphénols et de phycocyanine dans le glycérol avec des diminutions jusqu'à 91.45% du taux des triglycérides pour les polyphénols de *A. platensis* et la phycocyanine dans le glycérol de *A. fusiformis*.

Les extraits des polyphénols et de phycocyanine semblent avoir un effet sur les triglycérides plus intense que la spiruline en état.

En effet, les acides gras polyinsaturés (AGPI) oméga-3 et oméga-6 de la spiruline préviendraient l'accumulation de cholestérol dans l'organisme (RAMAMOORTHY et PREMAKUMARI, 1996 ; SAMUELS *et al.*, 2002). Ils ont observé une diminution des taux en cholestérol et triglycérides lors d'expériences opérées sur l'homme dont la nourriture a été

supplémentée avec de la spiruline. Cependant leur expérimentations ont portées sur de faibles effectifs.

La spiruline baisse le taux de cholestérol et des lipides sanguins (*CHEN et al.*, 1981 ; *DEVI et al.*, 1983 ; *BECKER et al.*, 1986; *NAKAYA et al.*, 1988 ; *KATO et al.*, 1988 ; *IWATA et al.*, 1990 ; *MANI et al.*, 2000 ; *DEVI et VENKATAMARAN*, 2002 ; *NAGAOKA et al.*, 2005).Elle présente aussi un effet contre l'hypertension artérielle (*BECKER et al.*, 1986).

Il en ressort de cette étude que les extraits phénoliques présentent toujours une bonne activité sur le cholestérol et les triglycérides : l'effet protecteur contre les maladies cardiovasculaires des polyphénol a déjà été prouvé (*CHANG et al.*, 1998).