

**THESE
POUR LE DIPLOME D'ETAT
DE DOCTEUR EN PHARMACIE**

Soutenue publiquement le 1^{er} juillet 2015
Par M^{elle} Hober Loanah

**LA SPIRULINE : MODELE DE CULTURE ET
D'UTILISATION DANS LA CACHEXIE, MIS EN PLACE PAR
L'ASSOCIATION « LES ENFANTS DU SOLEIL » BASEE A
MADAGASCAR.**

Membres du jury :

Président :

Mr Dine Thierry, Professeur des Universités - Praticien hospitalier, Pharmacie clinique,
Faculté des Sciences Pharmaceutiques et Biologiques de Lille.

Assesseur :

Mme Romond Marie-Bénédicte, Professeur des Universités, Bactériologie, Faculté des
Sciences Pharmaceutiques et Biologiques de Lille.

Membres extérieurs :

Mme Vanhaluwyn Chantal, Professeur honoraire, Faculté des Sciences Pharmaceutiques et
Biologiques de Lille.

Mr Masquelier Laurent, Docteur en Pharmacie, Roost-Warendin.



**Faculté des Sciences Pharmaceutiques
et Biologiques de Lille**



**Université Lille 2
Droit et Santé**

3, rue du Professeur Laguesse - B.P. 83 - 59006 LILLE CEDEX

☎ 03.20.96.40.40 - 📠 : 03.20.96.43.64

<http://pharmacie.univ-lille2.fr>

Université Lille 2 – Droit et Santé

Président : Professeur Xavier VANDENDRIESSCHE
Vice- présidents : Professeur Alain DUROCHER
Professeur Régis BORDET
Professeur Eric KERCKHOVE
Professeur Eric BOULANGER
Professeur Frédéric LOBEZ
Professeur Damien CUNY
Professeur Benoit DEPREZ
Professeur Murielle GARCIN
Monsieur Pierre RAVAUX

Monsieur Larbi AIT-HENNANI
Monsieur Antoine HENRY

Directeur Général des Services : Monsieur Pierre-Marie ROBERT

Faculté des Sciences Pharmaceutiques et Biologiques

Doyen : Professeur Damien CUNY
Vice-Doyen, 1^{er} assesseur : Professeur Bertrand DECAUDIN
Assesseur en charge de la pédagogie Dr. Annie Standaert
Assesseur en charge de la recherche Pr. Patricia Melnyk
Assesseur délégué à la scolarité Dr. Christophe Bochu
Assesseur délégué en charge des relations internationales Pr. Philippe Chavatte
Assesseur délégué en charge de la vie étudiante M. Thomas Morgenroth
Chef des services administratifs : Monsieur Cyrille PORTA

Liste des Professeurs des Universités - Praticiens Hospitaliers

Civ.	NOM	Prénom	Laboratoire
Mme	ALLORGE	Delphine	Toxicologie
M.	BROUSSEAU	Thierry	Biochimie
Mme	CAPRON	Monique	Immunologie

M.	DECAUDIN	Bertrand	Pharmacie Galénique
M.	DINE	Thierry	Pharmacie clinique
M.	DUBREUIL	Luc	Bactériologie
Mme	DUPONT-PRADO	Annabelle	Hématologie
M.	DUTHILLEUL	Patrick	Hématologie
M.	GRESSIER	Bernard	Pharmacologie
M.	LUYCKX	Michel	Pharmacie clinique
M.	ODOU	Pascal	Pharmacie Galénique
M.	DEPREUX	Patrick	Chimie Organique (ICPAL)

Liste des Professeurs des Universités

Civ.	NOM	Prénom	Laboratoire
M.	ALIOUAT	El Moukhtar	Parasitologie
Mme	AZAROUAL	Nathalie	Physique
M.	BERTHELOT	Pascal	Chimie Thérapeutique 1
M.	CAZIN	Jean-Louis	Pharmacologie – Pharmacie clinique
M.	CHAVATTE	Philippe	Chimie Thérapeutique 2
M.	COURTECUISSÉ	Régis	Sciences végétales et fongiques
M.	CUNY	Damien	Sciences végétales et fongiques
Mme	DELBAERE	Stéphanie	Physique
M.	DEPREZ	Benoît	Chimie Générale
Mme	DEPREZ	Rebecca	Chimie Générale
M.	DUPONT	Frédéric	Sciences végétales et fongiques
M.	DURIEZ	Patrick	Physiologie
M.	GARÇON	Guillaume	Toxicologie
Mme	GAYOT	Anne	Pharmacotechnie Industrielle
M.	GESQUIERE	Jean-Claude	Chimie Organique
M.	GOOSSENS	Jean François	Chimie Analytique
Mme	GRAS	Hélène	Chimie Thérapeutique 3
M.	HENNEBELLE	Thierry	Pharmacognosie
M.	LEMDANI	Mohamed	Biomathématiques
Mme	LESTAVEL	Sophie	Biologie Cellulaire
M.	LUC	Gerald	Physiologie
Mme	MELNYK	Patricia	Chimie thérapeutique 2
Mme	MUHR – TAILLEUX	Anne	Biochimie
Mme	PAUMELLE-LESTRELIN	Réjane	Biologie Cellulaire
Mme	PERROY – MAILLOLS	Anne Catherine	Droit et déontologie pharmaceutique
Mme	ROMOND	Marie Bénédicte	Bactériologie
Mme	SAHPAZ	Sevser	Pharmacognosie
M.	SERGHERAERT	Eric	Droit et déontologie pharmaceutique
M.	SIEPMANN	Juergen	Pharmacotechnie Industrielle
M.	STAELS	Bart	Biologie Cellulaire
M	TARTAR	André	Chimie Organique
M.	VACCHER	Claude	Chimie Analytique
M.	WILLAND	Nicolas	Chimie organique
M.	MILLET	Régis	Chimie Thérapeutique (ICPAL)

Liste des Maitres de Conférences - Praticiens Hospitaliers

Civ.	NOM	Prénom	Laboratoire
Mme	BALDUYCK	Malika	Biochimie
Mme	GARAT	Anne	Toxicologie
Mme	GOFFARD	Anne	Bactériologie
M.	LANNOY	Damien	Pharmacie Galénique
Mme	ODOU	Marie Françoise	Bactériologie
M.	SIMON	Nicolas	Pharmacie Galénique

Liste des Maitres de Conférences

Civ.	NOM	Prénom	Laboratoire
Mme	AGOURIDAS	Laurence	Chimie thérapeutique 2
Mme	ALIOUAT	Cécile Marie	Parasitologie (90%)
M.	ANTHERIEU	Sébastien	Toxicologie
Mme	AUMERCIER	Pierrette	Biochimie
Mme	BANTUBUNGI	Kadiombo	Biologie cellulaire
Mme	BARTHELEMY	Christine	Pharmacie Galénique
Mme	BEHRA	Josette	Bactériologie
M	BELARBI	Karim	Pharmacologie
M.	BERTHET	Jérôme	Physique
M.	BERTIN	Benjamin	Immunologie
M.	BLANCHEMAIN	Nicolas	Pharmacotechnie industrielle
M.	BOCHU	Christophe	Physique
M.	BRIAND	Olivier	Biochimie
Mme	CACHERA	Claude	Biochimie
M.	CARNOY	Christophe	Immunologie
Mme	CARON	Sandrine	Biologie cellulaire (80%)
Mme	CHABÉ	Magali	Parasitologie (80%)
Mme	CHARTON	Julie	Chimie Organique (80%)
M	CHEVALIER	Dany	Toxicologie
M.	COCHELARD	Dominique	Biomathématiques
Mme	DANEL	Cécile	Chimie Analytique
Mme	DEMANCHE	Christine	Parasitologie (80%)
Mme	DEMARQUILLY	Catherine	Biomathématiques
Mme	DUMONT	Julie	Biologie cellulaire
M.	FARCE	Amaury	Chimie Thérapeutique 2
Mme	FLIPO	Marion	Chimie Organique
Mme	FOULON	Catherine	Chimie Analytique
M.	GELEZ	Philippe	Biomathématiques
M.	GERVOIS	Philippe	Biochimie
Mme	GRAVE	Béatrice	Toxicologie
Mme	GROSS	Barbara	Biochimie
Mme	HAMOUDI	Chérifa Mounira	Pharmacotechnie industrielle
Mme	HANNOTHIAUX	Marie-Hélène	Toxicologie
Mme	HELLEBOID	Audrey	Physiologie
M.	HERMANN	Emmanuel	Immunologie
Mme	HOUSSIN-THUILLIER	Pascale	Hématologie
M.	KAMBIA	Kpakpaga Nicolas	Pharmacologie
M.	KARROUT	Youness	Pharmacotechnie Industrielle

Mme	LALLOYER	Fanny	Biochimie
M.	LEBEGUE	Nicolas	Chimie thérapeutique 1
Mme	LECOEUR	Marie	Chimie Analytique
Mme	LIPKA	Emmanuelle	Chimie Analytique
Mme	MARTIN	Françoise	Physiologie
M.	MOREAU	Pierre Arthur	Sciences végétales et fongiques
Mme	MUSCHERT	Susanne	Pharmacotechnie industrielle
Mme	NEUT	Christel	Bactériologie
Mme	NIKASINOVIC	Lydia	Toxicologie
Mme	PINÇON	Claire	Biomathématiques
M.	PIVA	Frank	Biochimie
Mme	PLATEL	Anne	Toxicologie
M.	RAVAUX	Pierre	Biomathématiques
Mme	RIVIERE	Céline	Pharmacognosie
Mme	ROGER	Nadine	Immunologie
M.	ROUMY	Vincent	Pharmacognosie
Mme	SEBTI	Yasmine	Biochimie
Mme	SIEPMANN	Florence	Pharmacotechnie Industrielle
Mme	SINGER	Elisabeth	Bactériologie
Mme	STANDAERT	Annie	Parasitologie
M.	TAGZIRT	Madjid	Hématologie
M.	WELTI	Stéphane	Sciences végétales et fongiques
M.	YOUS	Said	Chimie Thérapeutique 1
M.	ZITOUNI	Djamel	Biomathématiques
M.	FURMAN	Christophe	Pharmacobiochimie (ICPAL)
Mme	GOOSSENS	Laurence	Chimie Organique (ICPAL)

Professeurs Agrégés

Civ.	NOM	Prénom	Laboratoire
Mme	MAYES	Martine	Anglais
M.	MORGENROTH	Thomas	Droit et déontologie pharmaceutique

Professeurs Certifiés

Civ.	NOM	Prénom	Laboratoire
M.	HUGES	Dominique	Anglais
Mlle	FAUQUANT	Soline	Anglais
M.	OSTYN	Gaël	Anglais

Professeur Associé - mi-temps

Civ.	NOM	Prénom	Laboratoire
M.	DHANANI	Alban	Droit et déontologie pharmaceutique

Maîtres de Conférences ASSOCIES - mi-temps

Civ.	NOM	Prénom	Laboratoire
Mme	BERTOUX	Elisabeth	Pharmacie Clinique - Biomathématiques
M.	BRICOTEAU	Didier	Biomathématiques
M.	FIEVET	Pierre	Information Médicale
M.	FRIMAT	Bruno	Pharmacie Clinique
M.	MASCAUT	Daniel	Pharmacie Clinique
M.	WATRELOS	Michel	Droit et déontologie pharmaceutique
M.	ZANETTI	Sébastien	Biomathématiques

AHU

Civ.	NOM	Prénom	Laboratoire
Mme	DROUET	Maryline	Pharmacie Galénique
Mme	GENAY	Stéphanie	Pharmacie Galénique



Faculté des Sciences Pharmaceutiques et Biologiques de Lille

3, rue du Professeur Laguesse - B.P. 83 - 59006 LILLE CEDEX

Tel. : 03.20.96.40.40 - Télécopie : 03.20.96.43.64

<http://pharmacie.univ-lille2.fr>

L'Université n'entend donner aucune approbation aux opinions émises dans les thèses ; celles-ci sont propres à leurs auteurs.

Remerciements

A Madame Romond Marie-Bénédicte,

Je vous remercie d'avoir accepté d'être mon conseiller de thèse sans réserve et qui, par ses conseils, m'a permis de reprendre confiance en mon travail.

A Monsieur Dine Thierry,

Je suis honorée que vous ayez accepté la présidence de ce jury. Depuis le stage hospitalier que j'ai effectué dans votre service, j'espérais avoir la chance de vous compter parmi les membres de mon jury.

A Madame Vanhaluwyn Chantal,

Je vous remercie de l'intérêt que vous avez porté dès le début à mon sujet de thèse.

Un grand merci également pour les reconnaissances de champignons à la pharmacie Renault.

A Monsieur Masquelier Laurent,

Merci pour l'aide informatique qui m'a été précieuse dans cette dernière ligne droite.

Je te remercie de faire partie de mon jury.

A Josée Bernière,

Pour m'avoir permis de vivre une expérience exceptionnelle à Madagascar, entourée de belles personnes.

A l'Association « les Enfants du Soleil »,

Pour leur accueil chaleureux dans les différents villages de Madagascar où nous avons installé une pharmacie interne.

A Adrien,

Je te remercie pour ton soutien durant ces soirées « thèse » pas très agréables pour toi. Tu as toujours su me remotiver quand je n'avais pas le moral et cela tout au long de mes études.

A Maman et Papa,

Merci pour votre aide précieuse depuis ma naissance jusqu'à ce jour qui marque la fin de mes études.

Sans vous je n'en serais pas là.

A Candoo et Mana,

Merci pour tous ces bons moments passés entre sœurs.

Nos fous rires m'ont toujours remonté le moral.

Votre grande sœur est fière de vous.

A mon papy,

J'aurais tant voulu que tu sois présent aujourd'hui mais je sais que tu es fier de moi.

A toute ma famille et celle d'Adrien,

Merci pour vos encouragements et votre affection.

A mes amis,

Pour votre présence durant ces années d'études.

A Manon et Laura,

Je n'oublierais jamais l'expérience exceptionnelle que nous avons vécue à Madagascar.

A Adeline et à sa tante,

Pour m'avoir aidé et boosté pour finaliser ma thèse. Votre aide m'a été précieuse surtout pour la mise en page.

A Cricri,

Sans qui le sommaire automatisé n'aurait jamais vu le jour.

A la pharmacie Renault,

Merci de m'avoir poussée à enfin finaliser cette thèse. Et un petit clin d'œil particulier à Mémère pour les fautes d'orthographe.

Sommaire

INTRODUCTION	14
PARTIE I : Présentation de la spiruline	15
I. Généralités sur la spiruline	16
1. Histoire et classification	16
a. Origine.....	16
b. Systématique.....	19
2. Biologie et écologie	20
a. Théorie endosymbiotique	20
b. Ecologie.....	23
c. Reproduction	24
d. Toxicité	24
II. Composition de la biomasse alimentaire.....	26
1. Composition en protéines.....	26
2. Composition en lipides	27
a. Composition en lipides totaux	27
b. Composition en lipides saponifiables	27
c. Composition en lipides insaponifiables	28
3. Composition en glucides	28
4. Composition en vitamines	29
a. Vitamines hydrosolubles	29
b. Vitamines liposolubles.....	29
5. Minéraux et Oligoéléments.....	30
a. Fer.....	31
b. Zinc.....	32
c. Calcium	32
d. Phosphore	32
e. Magnésium.....	32
f. Potassium.....	33
6. Métaux.....	33
7. Pigments.....	35
8. Influence des conditions de culture sur la composition	36
PARTIE II : La culture de la spiruline : découverte au village « les Enfants du Soleil » à Antsirabe, Madagascar.....	37
I. L'Association « les Enfants du Soleil ».....	38
II. Culture de la spiruline.....	41
1. Influence du climat sur la culture	42

a.	Température.....	42
b.	Pluviométrie.....	42
c.	Saisonnalité.....	43
2.	Structure et bassins.....	43
a.	Construction des bassins de culture.....	44
b.	Couverture du bassin de culture.....	44
c.	Nombre et surface des bassins.....	46
d.	Agitation des bassins.....	47
3.	Milieu de culture.....	48
a.	Préparation du milieu de culture.....	48
b.	Et en absence de tout produit chimique?.....	51
c.	Renouvellement du milieu de culture.....	52
d.	Epuration et recyclage.....	53
e.	Stockage de milieu de culture neufs.....	53
4.	Ensemencement.....	54
a.	Quelle souche de spiruline utiliser?.....	54
b.	Ensemencement à partir d'une petite quantité de culture.....	55
c.	Taux de croissance initial.....	56
d.	Réserve de semences.....	57
e.	Cahier de conduite et entretien de la culture.....	58
5.	Récolte.....	59
a.	Filtration.....	59
b.	Lavage et essorage.....	61
c.	Lavage des outils.....	62
6.	Séchage et broyage.....	63
a.	Extrusion.....	63
b.	Séchage.....	64
c.	Broyage.....	67
7.	Conditionnement.....	68
8.	Contrôle de qualité.....	69

PARTIE III : Place de la spiruline dans le traitement de la cachexie : Observation de son utilisation dans les villages de l'association « les enfants du soleil »..... 70

I.	Généralités sur la cachexie.....	71
1.	Définition de la cachexie.....	71
2.	Etiologies.....	71
a.	Production ou consommation insuffisante.....	71
b.	Facteurs socioculturels.....	72
c.	Facteurs infectieux.....	72
3.	Les différentes formes de malnutrition.....	72
a.	Malnutrition protéino-énergétique.....	72
b.	Anémie nutritionnelle.....	73
c.	Carence en vitamine A.....	73

d.	Marasme et kwashiorkor	74
II.	Traitement de la cachexie	76
1.	Apports nutritionnels conseillés	76
2.	Rôles des éléments nutritifs pour le fonctionnement du métabolisme humain.....	77
a.	Rôle des protéines dans l'organisme	77
b.	Rôle des lipides dans l'organisme	79
c.	Rôle des glucides dans l'organisme	80
d.	Rôle des vitamines dans l'organisme	80
•	Rôle des vitamines hydrosolubles dans l'organisme	81
➤	Vitamine B1	81
➤	Vitamine B2	82
➤	Vitamine B3	82
➤	Vitamine B6	82
➤	Vitamine B9	83
➤	Vitamine B12	83
➤	Vitamine C	83
•	Apports nutritionnels conseillés en vitamines hydrosolubles et comparaison à la spiruline.....	84
•	Vitamines liposolubles.....	85
➤	Vitamine A et provitamine A	85
➤	Vitamine D	86
➤	Vitamine E	86
•	Apports nutritionnels conseillés en vitamines liposolubles et comparaison à la spiruline	86
e.	Rôle des minéraux et oligoéléments dans l'organisme	88
•	Minéraux et oligoéléments indispensables	88
•	Fonctions des principaux minéraux et signes de carence	89
➤	Fer.....	89
➤	Zinc	89
➤	Calcium	90
➤	Phosphore	90
➤	Magnésium.....	91
➤	Potassium	91
f.	Rôles des métaux.....	92
III.	Exemple d'utilisation de la spiruline dans la lutte anti-cachexie.....	93
1.	Exploitation des données d'autres essais de réhabilitation nutritionnelle menés à terme.	93
2.	Limites des études sur la réhabilitation nutritionnelle	95
3.	Observation de l'utilisation de la spiruline dans les villages de l'Association « les Enfants du Soleil »	96

CONCLUSION.....	97
------------------------	-----------

BIBLIOGRAPHIE	99
----------------------------	-----------

INTRODUCTION

Le groupe des cyanobactéries, anciennement appelées algues bleues, compte parmi l'une des plus anciennes formes de vie sur Terre et constitue l'essentiel des bactéries capables de photosynthèse avec production d'oxygène (1).

Parmi ces bactéries existe notamment le genre *Arthrospira* constitué de cyanobactéries filamenteuses parmi lesquelles se trouve *Arthrospira platensis* plus connue sous le nom de Spiruline. Sa couleur bleu-vert caractéristique est due à son principal pigment : la phycocyanine.

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

Riche en nutriments tel que protéines, glucides, lipides, vitamines et minéraux, elle est étudiée et utilisée par des organisations non gouvernementales (ONG) pour lutter contre la malnutrition.

Compte tenu de ses caractéristiques, la culture de la spiruline pourrait être une solution pour améliorer la santé humaine, la nutrition notamment dans les pays du tiers-monde et également pour développer des cultures industrielles (2).

Cette cyanobactérie semble actuellement l'une des meilleures solutions pour la production simple d'un complément alimentaire de haute qualité. L'Association « les Enfants du Soleil » basée à Madagascar a compris le potentiel de cette cyanobactérie. Elle cultive à petite échelle sa propre spiruline et l'utilise dans les différents villages de l'Association.

PARTIE I : PRESENTATION DE LA SPIRULINE

I. Généralités sur la spiruline

1. Histoire et classification

a. Origine

La spiruline considérée comme une algue bleue (cyanophycée) est plus précisément une cyanobactérie. Il s'agit d'une bactérie photosynthétique unicellulaire de couleur vert bleuâtre appartenant au genre *Arthrospira*.

Le genre *Arthrospira Stizenberger* regroupe des cyanobactéries (bactéries Gram négatif) filamenteuses, caractérisées par des trichomes cylindriques multicellulaires arrangés en spirale, des parois cellulaires et des vésicules gazeuses. Les bactéries sont motiles sous forme de trichome et leur diamètre varie généralement de 5 à 12 µm. Les cellules sont généralement plus courtes que larges ou isodiamétriques (1).

De nombreuses souches sont cultivées industriellement en raison de leur richesse en nutriments et minéraux. Suite aux changements taxonomiques sur la base de l'ARN16S, le genre *Spirulina* (non alimentaire) a été différencié du genre *Arthrospira*, source de la spiruline alimentaire (3). Plusieurs espèces du genre *Arthrospira* sont comestibles (4).

Arthrospira croit naturellement dans la ceinture tropicale du globe, entre 35°N et 35°S environ. Elle se trouve communément dans des eaux saumâtres, ainsi que dans des lacs salins de régions tropicales et semi-tropicales à pH fortement alcalin (1).

En dehors des deux genres pré-cités, d'autres cyanobactéries (Nostocs, Oscillatoria ...) colonisent de nombreux milieux (5).

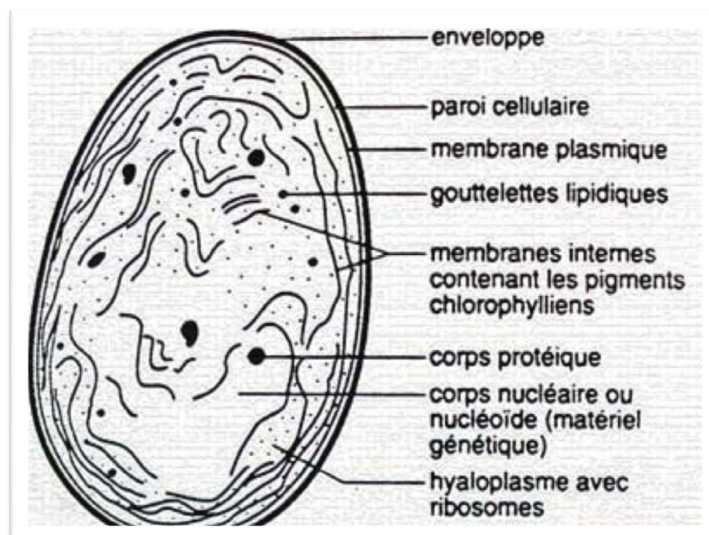


Figure 1 : Schéma d'une cyanobactérie en coupe (6)

Cette cyanobactérie apparue il y a 3,5 milliards d'années durant le précambrien, ainsi que les autres membres de ce phylum jouent un rôle majeur dans l'évolution de la vie sur Terre, en créant l'atmosphère aérobie nécessaire au développement des plastes des algues et plantes. De nos jours, elles apportent une contribution significative à la production globale d'oxygène dans les océans (7).

Arthrospira sous sa forme de biomasse séchée appelée communément « spiruline » a été utilisée de tous temps par différentes populations. Certaines sources nous permettent d'affirmer qu'elle occupait une place importante dans la nutrition (8).

Les aztèques, malgré de faibles ressources agraires, ont réussi à survivre pendant des siècles. En effet, la région de Mexico s'est construite autour de zones lacustres et bien que le poisson et les oiseaux du lac Texoco fournissaient un apport protéique, ils ne suffisaient pas à combler les besoins. Il semblait que la source complémentaire de protéines émanait d'une ressource qui provenait du lac, appelée Tecuitlatl (9,10).

De nombreux ouvrages de l'époque coloniale citaient déjà une certaine substance bleu-vert que les Aztèques utilisaient : le tecuitlatl. Ce limen, sorte de purée considérée par les colons comme minéral, était consommé par les paysans après avoir été séché et broyé.

De part son contenu qualitativement très remarquable, le tecuitlatl a joué un rôle important, sinon décisif, pour assurer une alimentation suffisante, correcte et équilibrée à la population aztèque.

Cependant, 125 ans après la colonisation, le développement de l'agriculture et de l'élevage du bétail a relégué le tecuitlatl au rang de souvenir (11).

Bien que déjà décrite par Wittrock et Nordstedt en 1844 (12), l'algue ne fut vraiment redécouverte par le botaniste belge J. Leonard lors d'une expédition belgo-française basée au Tchad en 1964.

Ce dernier a en effet constaté que les Kanembous de la région Kanem, écumaient la surface des mares, riches en carbonates de sodium, aux environs du lac Tchad à la recherche de la fameuse algue abondante sur ce lac (Figure 2). Elle était ensuite récoltée sous forme d'une purée bleu-verte qui était ensuite utilisée dans la préparation de gâteaux vendus dans la région et appelée « dihe » (13,14). Un phycologiste français avait examiné ces gâteaux dès 1940 et avait constaté qu'ils étaient faits d'une algue bleue comestible. Il s'avéra que les gâteaux contenaient essentiellement l'algue bleue *Arthrospira platensis* (14).

Peu après, lors du 7^{ème} congrès du pétrole en 1967 à Mexico, les chercheurs de l'Institut Français du pétrole rendirent compte de leurs travaux sur la spiruline, qui jusque-là étaient restés confidentiels. Ces chercheurs ont isolé des souches de spirulines ; les ont purifiées ; ils ont entrepris de les cultiver et d'en faire l'analyse chimique.

L'analyse des gâteaux des Kanembous prouve que les spirulines, qui en constituent la masse essentielle, ont un contenu nutritionnel fabuleux (15).



Figure 2: Photo d'une femme kanembou " écrémant " la spiruline de la surface du Lac Rombou (Tchad) (16)

b. Systématique

La Spiruline est souvent considérée comme une algue planctonique microscopique. En réalité, la spiruline est une bactérie à part entière, plus précisément, une cyanobactérie filamenteuse appartenant au genre *Arthrospira* (17,18).

On la classe donc comme suit :

Règne	Bacteria
Division	Cyanobacteria
Classe	Cyanophyceae
Ordre	Oscillatoriales
Famille	Oscillatoriaceae
Genre	<i>Arthrospira</i>
Espèce	<i>platensis</i>

Arthrospira : Nom scientifique et taxonomique d'un groupe de cyanobactéries auxquelles appartient notre spiruline alimentaire, par déformation on utilise aussi le nom de genre *Spirulina* qui est pourtant un genre non-alimentaire.

Les deux espèces les mieux connues sont *Arthrospira platensis*, originaire d'Afrique et *Arthrospira maxima* originaire d'Amérique centrale. L'espèce qui nous intéresse pour ce mémoire est l'espèce *platensis* (19).



Figure 3: Photo d' *Arthrospira platensis* (20)

2. Biologie et écologie

a. Théorie endosymbiotique

L'apogée des cyanobactéries a duré de 2,5 à 1,5 milliards d'années quand les cellules eucaryotes apparurent. Selon la théorie endosymbiotique, les organismes eucaryotes photosynthétiques comme les algues et les plantes proviendraient d'une endosymbiose de plastides par des cyanobactéries.

Cette théorie est soutenue par diverses similitudes structurelles et génétiques. Ainsi, des plastides issus d'une endosymbiose primaire contenant de la chlorophylle a et b mais pas de pigments accessoires ont été retrouvés dans des algues vertes et des plantes. D'autres plastides, contenant de la chlorophylle a et des phycobiliprotéines, ont été retrouvés dans des algues rouges et des glaucophytes. Ces plastides ont probablement une origine commune.

En effet, chez les algues rouges (Rhodophycées), on constate que les thylacoïdes possèdent des pigments accessoires, les phycobilines (phycocyanine et phycoerythrine), ce qui laisse penser que la bactérie symbiotique devait être une cyanobactérie qui possédait ces mêmes pigments. D'autres algues, ont acquis leurs plastes à partir de ces formes par endosymbiose secondaire (21).

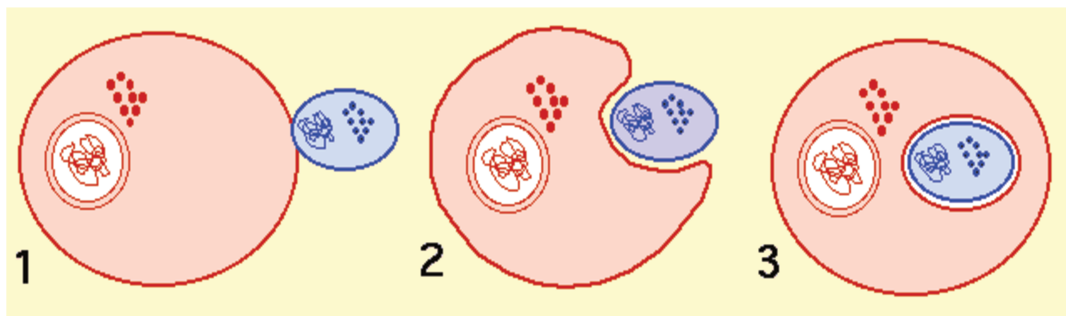


Figure 4 : Endosymbiose primaire : formation d'une cellule eucaryote hétérotrophe

Absorption d'une bactérie par une cellule eucaryote primitive et formation d'une cellule eucaryote hétérotrophe. Les bactéries absorbées deviennent des mitochondries et réalisent la respiration.

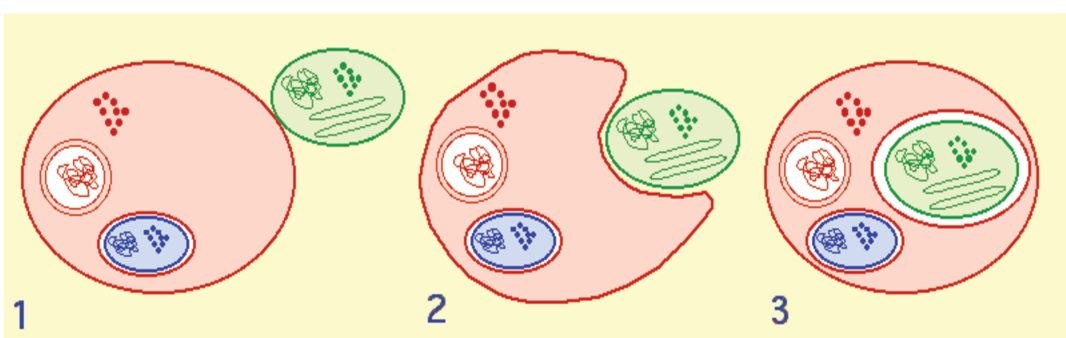


Figure 5 : Endosymbiose primaire : formation d'une cellule eucaryote autotrophe

Formation d'une cellule eucaryote autotrophe par absorption d'une bactérie photosynthétique par une cellule eucaryote hétérotrophe. Cette bactérie devient un chloroplaste, ses membranes internes ont une origine bactérienne. La membrane

externe de l'enveloppe a pour origine la membrane plasmique de la cellule elle-même.

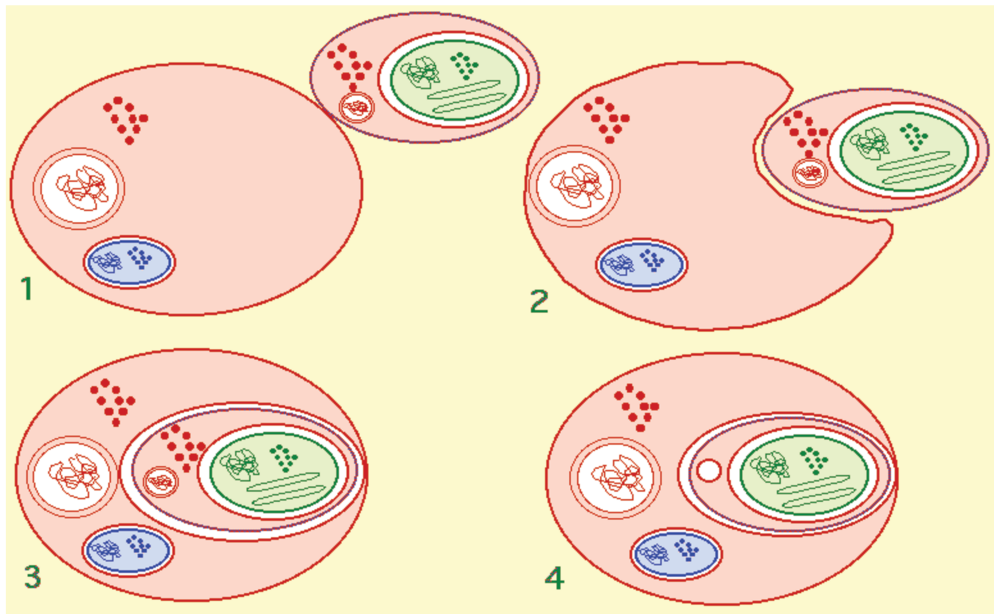


Figure 6 : Endosymbiose secondaire

Une cellule eucaryote hétérotrophe absorbe une autre cellule eucaryote autotrophe contenant un chloroplaste limité par une enveloppe à deux membranes (endosymbiose primaire). La membrane plasmique de la cellule symbiote et la membrane de phagocytose constituent une deuxième enveloppe externe. En général, le noyau et le cytoplasme de la cellule symbiote dégènèrent, le chloroplaste est alors entouré de quatre membranes (21).

b. Ecologie

La majorité des cyanobactéries sont capables de se déplacer, soit à l'aide de vésicules gazeuses (dans les liquides) soit, dans le cas des cyanobactéries filamenteuses, par glissement grâce à des microfibrilles (22). Ainsi, elles ont colonisé à peu près tous les milieux, qu'ils soient aquatiques ou terrestres, dans des conditions extrêmes puisqu'on les observe dans les glaces des pôles, dans des sources d'eaux ferrugineuses, dans les geysers...

Certaines cyanobactéries vivent en association avec des organismes animaux ou végétaux. Dans les eaux courantes comme stagnantes, leur mode de vie peut être planctonique (vivant dans la masse d'eau et se laissant transporter par ses mouvements) ou benthique (fixés aux substrats immergés) (23).

Grâce à leur activité biologique, ces espèces ont pu générer des formations géologiques : les stromatolithes. Ces roches carbonatées ont pu se former en abondance en piégeant le gaz carbonique de l'atmosphère primitive, participant ainsi à la modification de l'atmosphère primitive terrestre.

Anciennement appelées algues bleues puis cyanophycées, elles peuvent être unicellulaires ou pluricellulaires; dans ce dernier cas, leurs cellules s'arrangent en amas de type colonies ou, le plus souvent, en filaments appelés trichomes composés de cellules alignées. La taille des cellules de cyanobactéries se situe généralement entre 1 et 10 microns. Leur paroi est de type Gram-négatif classique (22).

Une des caractéristiques des cyanobactéries est l'existence de thylacoïdes, siège de la photosynthèse (24). Malgré ce système photosynthétique proche de celui des eucaryotes car contenant de la chlorophylle a et un photosystème II (PS-II), ce sont de vrais procaryotes (organismes dépourvus de membrane nucléaire).

Le photosystème, ainsi que les pigments photosynthétiques, les pigments accessoires et les composants du transport d'électrons sont inclus dans des membranes thylacoïdes comportant des granules dénommés "phycobilisomes".

L'association des granules protéiques à une partie pigmentaire donne les phycobiliprotéines. Ces granules contiennent en particulier un pigment essentiel au transport de l'énergie vers le PS-II, la phycocyanine. Cette protéine contient un groupement prosthétique de type polypyrrole qui lui confère une magnifique couleur bleue ainsi qu'une fluorescence rouge exceptionnellement efficace. C'est de cette couleur bleue caractéristique que provient la dénomination « algue bleue » donnée à cet organisme.

Les cyanobactéries assimilent le carbone à travers le cycle de Calvin et stockent énergie et carbone sous forme de glycogène. Bien que leurs schémas métaboliques varient considérablement, elles ont en commun l'absence de cycle de Krebs complet. Beaucoup de cyanobactéries, surtout parmi les filamenteuses, sont capables de fixer l'azote de l'air grâce à des structures spécialisées appelées hétérocystes (22).

Elles jouent ainsi un rôle important dans le cycle de l'azote, puisqu'elles ont la capacité de transformer l'azote atmosphérique en ammonium ou en nitrates, substances assimilables par les plantes à la mort des cyanobactéries.

c. Reproduction

La reproduction est végétative, c'est à dire asexuée et s'effectue par scission simple ou multiple, par bourgeonnement ou encore par fragmentation au hasard. Chez certaines espèces, des cellules spécialisées (akinètes) peuvent résister à la dessiccation puis "germer" lorsque les conditions redeviennent favorables (25). Selon les espèces et les conditions environnementales, les temps de doublement des populations varient de quelques heures à plusieurs jours.

d. Toxicité

Actuellement une quarantaine d'espèces de cyanobactéries secrètent des cyanotoxines qui sont généralement des neurotoxines pouvant être mortelles pour l'homme ou l'animal agissant sur différents organes cibles (foie, système nerveux).

Les genres principaux reconnus pour produire des toxines sont *Anabaena*, *Aphazinomenon*, *Cylindrospermopsis*, *Microcystis*, *Nodularia*, *Oscillatoria* et *Planktothrix*.

La plus grande partie des cyanotoxines produites s'accumulent à l'intérieur des cellules et l'ampleur de la production semble être corrélée avec la phase de croissance des cyanobactéries.

Ensuite, lorsque les bactéries sont à la fin de la période de sénescence, elles meurent et se lysent, provoquant le relâchement des toxines dans le milieu environnant. Ainsi, lorsque la période de floraison est en progression, on retrouve très peu de toxines extracellulaires alors que vers le déclin de celle-ci, la concentration de toxines extracellulaires augmente énormément (26).

Néanmoins, plusieurs espèces sont comestibles et ne produisent pas de toxines. *Arthrospira platensis* est une espèce non seulement comestible mais elle possède une composition particulièrement intéressante.

II. Composition de la biomasse alimentaire

L'analyse approfondie de la spiruline a permis de mettre en évidence : une composition protéique équilibrée, la présence de lipides essentiels rares ainsi que de nombreux minéraux et vitamines.

Il est bien établi que les variations de conditions de culture provoquent facilement des changements considérables dans la composition biochimique des spirulines. Cependant en moyenne, la spiruline contient en poids sec jusqu'à 70 % de protéines, 15 à 25 % de glucides, jusqu'à 11 % de lipides ainsi que des vitamines, des minéraux (principalement des oligoéléments), de la chlorophylle et des phycobiliprotéines (27).

1. Composition en protéines

Selon les souches et les conditions de culture, la quantité de protéines d'*Arthrospira platensis* varie de 55 à 70 % du poids sec (28).

Tableau 1 : Composition en acides aminés d'*Arthrospira platensis* (29)

Acides aminés	%	Acides aminés	%
Asp	0,9	Met*	0,8
Thr*	0,5	Ile*	1,3
Ser	0,6	Leu*	0,8
Glu	1	Tyr	3,3
Pro	0,3	Phe*	2,5
Gly	0,6	His	4,7
Ala	1	Lys*	1,9
Val*	1,3	Arg	2,1

* Acide amine essentiel

Ce spectre d'acides aminés montre que la valeur biologique des protéines de la spiruline est élevée et pourrait sûrement être optimisée par les procédés de culture. Par exemple, il a été noté une variation du contenu en protéines de 10 à 15 % selon le moment de la récolte par rapport à la photopériode. Ainsi, les valeurs les plus fortes sont obtenues au début de la période lumineuse (30).

2. Composition en lipides

a. Composition en lipides totaux

Selon les publications, la valeur du poids sec en lipides totaux varie de 5,6 à 14,3 % (31, 32, 33). Ces variations quantitatives mais aussi qualitatives sur la composition de ces lipides peuvent provenir de la méthode d'extraction et du moyen d'analyse utilisé ou simplement de la variété d'*Arthrospira platensis*.

Cette fraction lipidique se caractérise par un bon équilibre acides gras saturés/acides gras polyinsaturés.

Les lipides peuvent être séparés en une fraction saponifiable (83 %) et une fraction insaponifiable (17 %) contenant essentiellement de la paraffine, des pigments, des alcools terpéniques et des stérols (31).

b. Composition en lipides saponifiables

La fraction saponifiable est surtout composée de monogalactosyl diacylglycerol (MGDG), 10,3%, de digalactosyldiacylglycerol (DGDG), 6,44 % et de sulfoquinovosyldiacylglycerol (SQDG), 11,4 % et de phosphatidylglycerol, 25,9% (32).

On ne trouve ni phosphatidylcholine (lecithine), ni phosphatidylethanolamine (cephaline), ni phosphatidylinositol.

Les 3 glycolipides MGDG, DGDG et SQDG représentent près de 28 % des lipides totaux.

Les glycolipides sont les composants lipidiques majeurs de toutes les membranes des chloroplastes et des membranes photosynthétiques des cyanobactéries. Le MGDG et le DGDG se trouvent principalement dans les membranes thylacoïdes des

plantes et le SQDG est l'un des principaux lipides représentant parfois jusqu'à 40 % des lipides totaux pour certaines souches d'*Arthrospira*.

De tous les glycolipides isolés de la spiruline, l'acide palmitique (C16:0) représente plus de 40 % de acides gras totaux. Il faut aussi noter la présence d'acide gamma-linolénique (C18:3 n-6) en quantité relativement élevée (20,3%), et de l'acide linoléique (C18:2 n-6) jusqu'à 17,6 % des lipides totaux. Ces trois molécules sont les principaux acides gras du MGDG et du DGDG, alors que l'acide palmitique et l'acide linoléique sont les principaux acides gras présents dans le SQDG.

c. Composition en lipides insaponifiables

Il semble que les stérols représentent 1,5 % de la fraction non polaire des lipides chez l'espèce *Spirulina maxima*. La fraction stérolique est principalement composée de clionasterol (épimère en C-24 du β -sitosterol) et pauvre en cholestérol. Chez *Spirulina platensis*, on trouve aussi de faibles quantités de campesterol et de stigmasterol.

Les paraffines (hydrocarbures saturés à longues chaînes) représentent 25 % de la fraction insaponifiable chez *Spirulina platensis* soit entre 0,1 à 0,3 % d'hydrocarbures saturés dans la matière sèche des spirulines (8).

3. Composition en glucides

Les glucides constituent 15 à 25 % de la matière sèche des spirulines (8,15).

Ces hydrates de carbone composent notamment sa membrane cellulaire. Les parois cellulaires des spirulines s'apparentent à celles des bactéries de type Gram-négatif puisqu'elles sont formées de glucosamines et d'acide muramique associés à des peptides. Les formes primaires des hydrates de carbone sont le rhamnose et le glycoène, deux polysaccharides facilement absorbés par l'organisme. D'autres polysaccharides comme le calcium-spirulan (Ca-SP) sont composés de rhamnose,

ribose, mannose, fructose, galactose, xylose, glucose, acide glucuronique, acide galacturonique, sulfate et calcium (32). Cependant les glucides simples ne sont présents qu'en très faible quantité.

4. Composition en vitamines

Il existe 13 vitamines, 4 liposolubles (A, D, E, K) et 9 hydrosolubles (B1, B2, B3, B5, B6, B9, B12, C, PP).

La spiruline contient la plupart de ces vitamines et spécialement des vitamines B dans des proportions optimales.

a. Vitamines hydrosolubles

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

Il faut noter que la biomasse poussant en printemps et en été montre une proportion en vitamines plus élevée. Ceci dépendant essentiellement des conditions d'ensoleillement (33).

b. Vitamines liposolubles

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

Tableau 2 : Vitamines liposolubles contenues dans la biomasse d'*Arthrospira platensis* (mg/100g de matière sèche) (34)

Vitamines	Quantités
β-carotene (provitamine A)	64 à 200 mg/100g
Tocopherol (Vitamine E)	10 à 19 mg/100g
Vitamine D	12000 U soit 0,3 mg/100g

5. Minéraux et Oligoéléments

Les macroéléments ou minéraux se différencient des oligoéléments entre autres par les quantités quotidiennes que nous devons apporter à notre organisme. Les besoins en macroéléments sont de l'ordre du gramme (g) ou du dixième de gramme par jour tandis que ceux en oligoéléments sont de l'ordre du milligramme (mg).

Les oligoéléments ou éléments traces présents dans la spiruline sont le fer, le zinc, le cuivre, le sélénium, l'iode, le fluor, le chrome, le calcium et magnésium, les autres éléments, en quantité plus significative, sont considérés comme des minéraux.

Tableau 3 : Minéraux et oligoéléments contenus chez *Arthrospira platensis* (35)

Eléments	Quantités (mg/kg de biomasse sèche) ^{1°}
Cr	11,3 à 14,2
Fe	900 à 1176
Mn	554 à 592
Zn	21 à 375
Ca	4320
Cl	4890
K	9000
Mg	670 à 2700
Na	4500 à 235000
P	6700 à 9000

1° Dosages effectués par 2 méthodes analytiques : INAA = instrumental neutron activation analysis (technique non destructive) et ICP-AES = inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry (technique destructive). La méthode ICP-AES donne naturellement des valeurs plus basses que la méthode INAA mais l'utilisation de 2 techniques différentes est utile pour quantifier un large spectre de minéraux.

A noter la très forte concentration en sodium (235 g/kg) qui dépend de la haute salinité du milieu de culture (35). Néanmoins, cette concentration est au minimum de 4,5 g/kg ce qui est tout de même élevé pour un aliment.

Cependant d'autres publications donnent des chiffres différents pour ces oligoéléments mais elles ne précisent pas s'il s'agit de dosages réalisés chez *Arthrospira platensis* ou *Arthrospira maxima*.

Ainsi pour 1 kg de spiruline, des valeurs de 10 g de calcium, 1,6 g de potassium, 4,6 g de manganèse, et 0,88 à 1,5 g de fer hautement assimilable ont été trouvées (34).

a. Fer

Présent en quantité élevée d'environ 1g/kg, la spiruline est une source de fer non négligeable couvrant la quasi-totalité des besoins, d'autant plus que le fer contenu est hautement assimilable. La biodisponibilité du fer de la spiruline a été démontrée par une étude menée par Johnson sur des rats carencés, les rats ayant consommé de la spiruline avaient absorbé 60 % de fer en plus que le groupe qui recevait une supplémentation en fer (34). Cette biodisponibilité a aussi été démontrée chez l'homme (36). 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. Selon les mêmes travaux, le taux de formation de ferritine après digestion de spiruline serait plus de six fois plus élevé que dans le cas d'une même quantité de fer apportée par digestion de viande.

La spiruline est donc potentiellement une bonne source alimentaire de fer pour lutter contre les anémies ferriprives. De plus, les aliments présentant cet avantage sont rares, ainsi pour comparaison, les céréales complètes n'en contiennent que 150 à 250 mg/kg (24).

b. Zinc

La spiruline cultivée sans apport intentionnel de zinc au milieu de culture n'en contient généralement que des traces (21-40 µg/g), alors qu'on peut en trouver dans certaines spirulines naturelles près de 400 µg/g (37). Ces valeurs sont insuffisantes pour que ces spirulines puissent être considérées comme de bonnes sources de zinc, car les apports nutritionnels conseillés sont de 0,6 à 6 mg/j chez un nourrisson/enfant (ces variations dépendent du type de régime alimentaire associé), de 10 à 13 mg/j pour un adolescent et de 10 à 12 mg/j chez l'adulte.

c. Calcium

10g de spiruline couvrent 10 % des apports nutritionnels conseillés.
Ce qui est comparable à la teneur du lait (1200 mg/L).

d. Phosphore

Les besoins en phosphore selon les individus sont présentés dans le tableau ci-après mais d'une manière générale, les apports nutritionnels conseillés varient entre 350 et 850 mg/j selon l'âge.

La spiruline est riche en phosphore et permet un apport de 9 mg/kg et couvrirait plus de 20 % des besoins du jeune enfant si celui-ci en mangeait seulement 10g par jour.

e. Magnésium

En quantité d'environ 25 g dans le corps humain, le besoin moyen en Mg est de 5 mg/kg quel que soit le sexe (38). La spiruline est donc une bonne source en magnésium car pour un apport de seulement 10 g par jour, elle couvre entre 8 et 34% des besoins du jeune enfant.

Calcium, phosphore et magnésium sont présents en quantités comparables voire supérieures à celles trouvées dans le lait, la spiruline est de ce fait bénéfique pour lutter contre la décalcification osseuse.

f. Potassium

Bien que les ANC pour le potassium ne soient pas connus, la spiruline peut aussi être considérée comme une bonne source avec près de 9 g/kg (Tableau 3).

A noter que la très forte concentration en sodium et potassium pourrait être source d'hypertension en cas de consommation excessive de spiruline.

6. Métaux

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

Certains métaux ont été cités comme des oligoéléments, ils ont été répertoriés malgré tout dans le tableau ci-après.

Tableau 4 : Niveaux des éléments traces chez *Arthrospira platensis* (35)

Elément	Quantité par échantillon de Spiruline (mg/kg de matière sèche)
As	0,002
Br	17,9
Cd	inférieur à la limite de détection
Co	0,720
Cr	14,2
Cs	0,021
Cu	37,5
Eu	0,023
Hg	0,120
La	0,514
Mn	27,88 à 554
Ni	inférieur à la limite de détection
Pb	12,9
Sb	0,064
Sc	0,075
Se	0,198
V	inférieur à la limite de détection
Zn	21 à 375

Le manganèse et le zinc montrent des valeurs maximales élevées avec respectivement 554 et 375 mg/kg provenant de l'étude d'Avino *et al.* (35). Concernant le zinc, cette valeur élevée pourrait, provenir d'une pollution environnementale. La spiruline cultivée sans apport intentionnel de zinc au milieu de culture n'en contient généralement que des traces (21-40 µg/g) (37). Pour le manganèse, cette valeur haute n'a été trouvée que dans un échantillon d'origine naturel de *Spirulina platensis* alors que dans les échantillons d'origine commerciale, la valeur est en général plus basse d'un facteur dix.

La spiruline, comme toute bactérie élevée en milieu contaminé en métaux lourds, a montré une forte capacité à fixer certains polycations, parmi lesquels le cadmium, le plomb, le chrome et le cuivre. D'un point de vue toxicologique, cette propriété

pourrait s'avérer dangereuse si l'alcalinité élevée des milieux de culture de la spiruline ne limitait fortement la solubilité de la plupart des cations métalliques.

A noter que des fortes teneurs en métaux lourds n'ont été observées que pour les spirulines récoltées en milieu naturel, milieu pouvant être contaminé et où un contrôle de la teneur en contaminant est difficile. A l'inverse, les spirulines élevées en milieu artificiel présentent des valeurs en métaux lourds très faibles. La toxicité des spirulines d'élevage semble de ce fait inexistante.

Ainsi la spiruline est un aliment à hautes qualités nutritives grâce à la diversité et la richesse de ses constituants. Elle semble présenter plusieurs activités biologiques, mais ces données doivent être considérées avec certaines réserves puisqu'il s'agit souvent d'études réalisées sur des molécules isolées extraites de souches de spiruline et que la plupart ne sont que des tests in vitro.

7. Pigments

La spiruline est riche en pigments responsables de sa couleur. Les principaux pigments sont la phycocyanine et la chlorophylle.

La phycocyanine est une phycobiliprotéine. Seul colorant bleu alimentaire naturel, elle est le pigment le plus abondant de la spiruline et représente plus de 15 % du poids frais et plus de 20 % du poids sec de l'algue. La chlorophylle est présente en proportion de 9-15 g/kg (39,40).

Les phycocyanines, composants de l'appareil photosynthétique des cyanobactéries, sont les protéines majeures de la spiruline. Naturellement colorées d'un bleu intense et pourvues d'une fluorescence rouge, elles sont responsables du bleuissement de la poudre de spiruline exposée trop longtemps à la lumière : moins sensible que la chlorophylle à la photo-destruction, leur couleur domine lorsque le vert chlorophyllien disparaît. C'est aussi aux phycocyanines que l'on doit l'intense couleur bleue qui apparaît plus ou moins rapidement lorsque l'on réhydrate de la spiruline séchée : l'éclatement des cellules libère ces protéines très solubles dans l'eau, alors que la chlorophylle reste associée aux débris cellulaires.

Les phycocyanines ont donné lieu à de nombreuses recherches scientifiques, détaillées plus loin, démontrant l'incroyable potentiel thérapeutique de ces protéines.

8. Influence des conditions de culture sur la composition

Selon les publications, il peut y avoir des différences de teneur en protéines, en lipides, en vitamines ou en minéraux, ces données doivent donc être prises avec la plus grande réserve : ces valeurs sont probablement bien plus liées aux conditions de croissance de chaque échantillon qu'à d'hypothétiques spécificités génétiques entre les différentes espèces ou variétés de spiruline.

Concernant le fer, par exemple, les spirulines naturelles en contiennent rarement plus de 500 mg/kg, bien que des valeurs supérieures à 1000 mg/kg de fer aient été publiées (37). Dans le cas des spirulines cultivées, l'ajout au milieu de culture de sels de fer peut élever facilement ces valeurs au-dessus de 1000 mg/kg.

Certains brevets récents semblent impliquer la possibilité d'enrichir la spiruline en fer jusqu'à des niveaux extrêmes (supérieurs à 25000 mg/kg). Il est évident que de tels niveaux de fer placent ces spirulines dans un domaine plutôt pharmaceutique qu'alimentaire et pourraient poser d'éventuels problèmes de surdose en fer.

Il faut donc apporter un bémol à la composition des spirulines, car comme les exemples ci-dessus le démontrent, les conditions de culture qu'elles soient naturelles ou artificielles peuvent influencer de façon significative la composition nutritionnelle que ce soit qualitativement ou quantitativement.

L'étude de la composition de la spiruline a permis de démontrer son extrême richesse en nutriments. Leurs présences réunies dans une seule et même bactérie apportent à celle-ci une valeur nutritionnelle unique.

La spiruline d'un point de vue qualitatif et quantitatif, semble répondre aux besoins essentiels de l'homme.

**PARTIE II : LA CULTURE DE LA SPIRULINE :
DECOUVERTE AU VILLAGE « LES ENFANTS DU SOLEIL »
A ANTSIRABE, MADAGASCAR.**

I. L'Association « les Enfants du Soleil »

L'association les Enfants du Soleil a été créée en 1985 par Robert Richard. Il finance son activité avec ses ressources personnelles, puis devant l'ampleur des besoins, il fait appel à des donateurs notamment aux membres de sa promotion de Saint-Cyr. En 1990, l'association se voit accordée la qualité « d'association de bienfaisance ».

En 1992, à l'occasion d'un voyage de François Mitterrand à Madagascar, les autorités Malgaches ont envoyé la police ramasser les enfants des rues pour les abandonner sans soins dans des usines désaffectées près d'Antanarivo.

Dès qu'il apprend la terrible nouvelle, Robert Richard se rend sur place et constate que la misère dans ce pays est encore plus épouvantable que celle qu'il avait connue ailleurs.

Il décide de transférer l'activité de l'Association initialement basée au Sénégal et au Tchad dans ce pays et ouvre un centre à Antananarivo et un centre à Antsirabé.

Le franc malgache était à un taux tel qu'à ressources égales en francs français il pouvait sauver beaucoup plus d'enfants dans cette île qu'au Sénégal et au Tchad.

En 1994, Robert Richard atteint par la maladie de Parkinson cède sa place à un autre militaire confirmé dans l'aide humanitaire : Pierre Boutaud.

Ce dernier trouve de nouveaux donateurs et instaure le modèle des villages à Antsirabe puis à Fianarantsoa. Enfin, en 2009, Roger Thivoyon devient Président de l'Association (41).



Figure 7 : Carte de Madagascar (42)

« Les Enfants du Soleil » (EDS) est donc une Organisation Non Gouvernementale (ONG) française œuvrant à Madagascar. Elle porte secours aux enfants qui vivent dans les rues des grandes villes après avoir coupé tout contact avec leur famille. Son objectif est d'accompagner ces enfants jusqu'à leur réinsertion sociale et d'en faire des citoyens responsables.

L'association par le biais des éducateurs et des assistants sociaux essaie d'établir un lien avec les enfants des rues afin de leur proposer de rejoindre des Centres d'Accueil et d'Ecoute (CAE). Dans les cas où les enfants peuvent retrouver leur famille, EDS leur apportent aide alimentaire et suivi scolaire et médical. Dans le cas contraire, sous décision d'un juge malgache, les enfants sont accueillis dans les villages EDS où se trouvent des foyers familiaux regroupant une quinzaine d'enfants, encadrés par deux éducateurs.

L'ONG dispose aussi de Centres d'Aide au Travail (CAT) dans lesquelles les jeunes mamans célibataires des rues trouvent un toit, de la nourriture et l'occasion de suivre une formation professionnelle.

EDS a en charge plus de 2000 enfants et femmes célibataires venant de la rue et emploie exclusivement du personnel malgache.

L'association est implantée à différents endroits de « l'île Rouge » : Antsirabe, Fianarantsoa, Antananarivo et Tamatave.

C'est précisément sur ces différents villages EDS que nous sommes intervenues, notre mission consistait à mettre en place des pharmacies internes dans ces différents sites de l'association. Nous devons former des éducateurs à la bonne tenue de la pharmacie selon un protocole établi et mettre en place un cahier de dispensation ainsi qu'un cahier de stocks. Nous devons participer également à la vie active de l'association : activités avec les enfants et aide aux devoirs.

Antsirabe a été le point de départ de notre aventure, en effet ce village EDS est le mieux organisé et nous a servi de « modèle » pour les autres villages où nous avons ensuite œuvré. Et c'est au cœur de ce village que j'ai pu observer la culture de la spiruline.



Figure 8 : Photo de la maison principale du village EDS d'Antsirabe (43)

II. Culture de la spiruline

Arthrospira platensis (anciennement *Spirulina platensis*) vit de photosynthèse comme les plantes et prospère naturellement dans les lacs salés et alcalins des régions chaudes du globe. La spiruline est maintenant cultivée et parfois même à grande échelle car on lui découvre toujours plus de qualités intéressantes pour l'alimentation et la santé (2).

Il existe néanmoins des petites productions appelées « fermes ». Elles sont destinées à une production et une utilisation locale uniquement pour couvrir les besoins de l'Association dans laquelle elle est mise en place.



Figure 9 : Photo du site dédié à la culture de la Spiruline.

Un exemple parfait de ce type de culture est la ferme mise en place sur le site de l'Association « les Enfants du Soleil » basé à Antsirabe.

La culture de la spiruline a été mise en place sur ce site par Antenna Technologies France (ATF).

Cette Association de Solidarité Internationale, créée à Paris en octobre 2002, est engagée dans le combat contre la malnutrition et l'extrême pauvreté.

ATF fait partie du réseau de la fondation suisse Antenna Technologies engagée dans la recherche et la diffusion de technologies adaptées aux besoins essentiels des pays en développement.

La mission d'ATF est de mettre en place des fermes locales de production et

distribution de spiruline durables, autonomes et financièrement viables (44).

1. Influence du climat sur la culture

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

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

a. Température

Les premiers repères concernant les températures sont à peu près les mêmes que pour l'homme, 37°C : température idéale pour pousser. Au-dessus, c'est trop chaud. En dessous, la vitesse de multiplication baisse avec la température. A 20°C la croissance est pratiquement stoppée. La température du milieu de culture doit donc se situer entre ces deux températures.

La construction de bassins sous serre peut être d'autant plus intéressante que cet abri constitue non seulement une protection contre le froid, l'évaporation, les insectes et les poussières mais aussi contre les pluies diluviennes, comme les orages, qui peuvent faire déborder les bassins et donc provoquer une perte, ou au moins une dilution du milieu de culture (45).

b. Pluviométrie

La conduite de bassins de culture nécessite un minimum de ressources en eau. Les eaux de pluie sont intéressantes car propres et neutres (pas de minéraux en

solution). Sous les climats à saison sèche longue, il peut être nécessaire de prévoir une citerne pour stocker de l'eau de pluie et compenser ainsi l'évaporation des bassins. Il faudra alors tenir compte de la qualité de l'eau dans la mise au point, puis l'entretien du milieu de culture.

Dans un climat frais la culture sous serre est facile avec une faible consommation d'eau (45).

c. Saisonnalité

La culture de spiruline est saisonnière. Durant la mauvaise saison, une "souche" de spiruline devra impérativement être conservée dans son milieu de culture. Les contenants devront laisser passer la lumière et être stockés dans un lieu clair mais à l'ombre. Il est prudent de ne pas stocker les cultures de spiruline en-dessous de 18°C pendant de longues périodes, car les risques de contamination augmentent.

Le fait que la spiruline prospère en milieu très alcalin présente deux avantages majeurs :

- meilleure absorption du gaz carbonique de l'air
- protection contre les contaminations (algues vertes unicellulaires comme les chlamydomonas) et contre les animaux (vers rouges, larves de moustiques, insectes nageurs) (45).

2. Structure et bassins

Où implanter les bassins? Il faut respecter quelques règles parfois difficiles à respecter: pas sous des arbres, ni en un lieu inondable, ni près d'une route ou d'une industrie (pollution). A l'abri des curieux, souvent ignorants et pas toujours bien intentionnés. Un terrain plat facilitera le travail, de même que la proximité de l'eau

a. Construction des bassins de culture

Pour une culture artisanale on peut se contenter de bassins de petite taille, sans agitation par roue à aube. Il y a alors de nombreuses façons de construire un bassin adéquat selon les conditions locales.

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, pour encaisser les pluies, faciliter les transferts entre bassins et l'autoépuration biologique du milieu de culture. Les bassins, surtout les plus profonds, doivent faire l'objet de précautions pour éviter l'accès des petits enfants.

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 en utilisant un adjuvant imperméabilisant ou une peinture époxy. 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 (46).

b. Couverture du bassin de culture

Il est nécessaire, d'installer une serre ou au moins un toit sur le bassin, permettant de le protéger contre les excès de pluie, de soleil ou de froid, et contre les chutes de feuilles, fientes d'oiseaux, vents de sable et débris divers, tout en lui permettant de "respirer".

Il peut aussi être en plastique translucide : film de polyéthylène traité anti-UV utilisé pour la construction des serres horticoles.

Poser et tendre le film par temps chaud pour éviter qu'il ne se détende par temps froid.

Un mode de réalisation économique d'un bassin sous serre consiste à faire un muret en éléments rigides (parpaings ou briques cimentés ou non, planches vissées sur

des piquets en acier, bottes de paille), à poser le film d'étanchéité en recouvrant le muret et en l'enterrant sur les bords puis à tendre par-dessus un film de serre lui-même enterré sur les bords. Une légère pente (4 %) du film de serre suffit pour que même par pluies très violentes l'eau ruisselle sur le film sans s'y accumuler, à la condition expresse que le film soit tendu comme une peau de tambour ou un tissu de parapluie ; la pente peut être fournie par des poutres ou chevrons en bois formant comme une charpente basse sur le bassin (46).

Pour accéder au bassin et l'aérer il est nécessaire d'installer en au moins un point (mais de préférence deux) une "porte" d'accès, simple cadre vertical sur lequel repose le bord du film qui reste non enterré à cet endroit ; la porte peut être fermée par une moustiquaire (non seulement contre les insectes mais aussi les feuilles mortes). Prévoir la construction pour que la composante horizontale de la tension du film ne fasse pas basculer le muret.

Le mode de réalisation le plus économique d'un bassin sous serre utilise le même film (film de serre) pour le fond, les côtés et la couverture. Avec un film de serre de largeur standard (6,5 m) on réalise facilement des bassins jusqu'à 30 m². Le faîte peut être un chevron en bois de 6 x 8 cm, de 5 m de long fixé à environ 1,5 m de haut. Le film est agrafé sur le faîte d'un côté, puis de l'autre avant d'être fixé par liteaux sur le faîte. Aux deux extrémités on place un rebord en planches ou parpaings sur lequel est relevé et fixé solidement le bord du film, et on aménage deux "portes" d'accès à munir de moustiquaires. Le coût des matériaux s'élève à 5 \$/m² si la sous-couche de protection est réalisée en film plastique de récupération (usagé), hors ombrage, protection latérale et agitation. Une protection latérale est en fait recommandée contre les dommages causés notamment par les animaux : la placer à au moins 50 cm des bords si elle est en matériau brut pouvant endommager le film lors de ses déplacements par grand vent. Pour assurer la stabilité par grand vent, remplir le bassin d'au moins 20 cm.

L'utilisation de film de serre pose le problème de sa qualité du point de vue alimentaire. Il convient de vérifier que la spiruline cultivée à son contact ne va pas être polluée. Certains films (ceux qui sont légèrement jaunes) sont stabilisés contre les UV par un composé à base de cadmium. Après analyse, le cadmium ne migre pas du plastique vers le milieu de culture et ne pollue pas la spiruline.

Un bassin sous serre suffisamment étanche présente l'avantage de pouvoir être alimenté en gaz carbonique provenant de la combustion de gaz ou d'une fermentation (compost) grâce à son atmosphère contrôlable.

Une serre ombrable et aérable est idéale en tous climats car elle permet un contrôle maximum tant de la température, de la lumière, de la pluie et de l'évaporation que des insectes et autres animaux, poussières, feuilles mortes ; elle est la protection la plus efficace pour réduire le plus possible la consommation d'eau en climat aride (47).



Figure 10 : Photo de la serre d'Antsirabe

c. Nombre et surface des bassins

Mieux vaut construire deux ou plusieurs petits bassins qu'un seul grand : ainsi on pourra en vider un (pour le nettoyer ou le réparer par exemple) sans perdre son contenu, et si une des cultures se contamine, n'est pas en bonne santé ou meurt, l'autre permettra de continuer et de réensemencer. Il peut être aussi pratique de puiser dans un bassin pour filtrer sur un autre. Un m² de bassin couvre le besoin en spiruline d'une à 5 personnes selon la dose. Le coût d'investissement au m² décroît quand augmentent la surface unitaire et le rapport surface/périmètre des bassins. Par contre des bassins étroits (largeur inférieure à 3 m) sont plus faciles à agiter et à couvrir. Une surface unitaire de 10 à 20 m² paraît pratique au niveau familial ou pour un dispensaire.

Pour une production artisanale la surface totale des bassins ne dépassera guère 50 à 100 m².

d. Agitation des bassins

L'agitation est nécessaire pour homogénéiser, favoriser l'élimination de l'oxygène et assurer une bonne répartition de l'éclairage parmi toutes les spirulines. Sauf en cas de soleil très fort, on peut se contenter d'agitations plus ou moins fréquentes (quelques minutes toutes les heures, au moins 4 fois par jour), manuelles avec un balai ou une rame, ou par pompes n'endommageant pas les spirulines

Une pompe d'aquarium à entraînement magnétique de 800 l/h, 8 Watt, fonctionnant 15 minutes par heure ou par demi-heure (programmateur à horloge), suffit pour agiter 5 à 10 m² de bassin si elle est bien positionnée et si les bords du bassin sont réguliers et ses angles arrondis. Une chicane médiane peut faciliter la circulation, mais il faut en général la compléter par des chicanes d'angles redirigeant les flux des bords vers le centre, ce qui complique l'installation : dans un petit bassin de dimensions bien choisies la chicane centrale est totalement inutile. L'installation d'une chicane médiane dans les bassins en bâche plastique (recouvrant la chicane) pose le problème des plis qu'il faut éviter au maximum. Ce problème est minimisé si la chicane est de faible hauteur (20 cm) et ses extrémités arrondies. Mais certains préfèrent des chicanes (en bois par exemple) posées par dessus la bâche ; dans ce cas il faut veiller à minimiser le by-pass sous la chicane.

Mieux vaut une agitation discontinue énergique que continue mais faible. Même une agitation énergique sera plus efficace si elle est intermittente car à chaque redémarrage il se produit un brassage, alors qu'en continu la masse d'eau a tendance à se déplacer d'un bloc (sauf si des chicanes sont installées en travers du courant). C'est une bonne pratique d'agiter au balai le bassin au moins une fois par jour, surtout s'il est assez profond.

3. Milieu de culture

a. Préparation du milieu de culture

Les spirulines vivent dans une eau à la fois salée et alcaline. L'eau utilisée pour le milieu de culture doit être de préférence potable, le plus important étant l'élimination des algues étrangères. L'eau de pluie, de source ou de forage est en général de qualité convenable. Si l'eau est dure, il se produira des boues minérales (plus ou moins abondantes selon la teneur en calcium, magnésium et fer), qui décantent rapidement et ne sont pas particulièrement gênantes pour la culture, à condition toutefois que l'ensemencement initial en spirulines soit assez concentré.

Les limites de salinité et basicité sont de 13 g/litre pour la salinité et de 0,1 molécule gramme/ litre pour la basicité ; mais ces concentrations peuvent être doublées sans inconvénient. L'alcalinité est habituellement apportée par du bicarbonate de sodium, mais ce dernier peut être remplacé en partie par de la soude caustique ou du carbonate de sodium pour relever le pH initial du milieu de culture (par exemple 5 g/l de bicarbonate + 1,6 g/l de soude donnent un pH de 10) ; La salinité complémentaire est apportée par les différents engrais et du chlorure de sodium. Le sel de cuisine iodé et fluoré peut convenir mais souvent il contient de la magnésie insoluble : mieux vaut utiliser un sel n'en contenant pas. Si le sel apporte trop de magnésium, cela entraîne des flocs et précipite la spiruline au fond sans qu'on puisse la récupérer. En plus du sel et de la soude, le milieu de culture contient des engrais pour assurer la croissance des spirulines comme en agriculture habituelle : azote (N), phosphore (P), potassium (K) sont les trois principaux éléments, mais soufre (S), magnésium (Mg), calcium (Ca) et fer (Fe) doivent aussi être ajoutés s'ils ne sont pas apportés en quantité suffisante par l'eau, le sel et les engrais. Une analyse de l'eau et du sel est utile pour calculer la dose de Mg, Ca et Fe à ajouter car un excès de ces éléments est nocif (perte de phosphore, formation de boues). L'eau, le sel et les engrais apportent généralement assez d'oligoéléments (bore, zinc, cobalt, molybdène, cuivre, etc.) (48).

Les sources d'azote préférées des spirulines sont l'ammoniac et l'urée (nom commun du carbamide), mais ces produits sont toxiques au-delà d'une concentration limite C'est pourquoi on préfère souvent, au moins lors de la préparation du milieu de

culture, utiliser un nitrate dont on peut mettre une forte dose, constituant une réserve d'azote à long terme. Les spirulines consommeront d'abord l'ammoniac ou l'urée s'ils sont disponibles. Une légère odeur passagère d'ammoniac révèle qu'on s'approche de la limite autorisée ; une odeur persistante et forte indique qu'on l'a sûrement dépassée et qu'il faut s'attendre à un mauvais état de la culture.

Le phosphore est apporté indifféremment par n'importe quel orthophosphate soluble disponible, par exemple le phosphate monoammonique ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$), le phosphate dipotassique (K_2HPO_4) ou le phosphate trisodique ($\text{Na}_3\text{PO}_4, 12 \text{ H}_2\text{O}$), ou encore l'acide phosphorique lui-même.

De même le potassium peut être apporté indifféremment par le nitrate de potassium, le chlorure de potassium, le sulfate ou le phosphate dipotassiques.

La source de magnésium habituelle est le sulfate de magnésium appelé sel d'Epsom ($\text{MgSO}_4, 7 \text{ H}_2\text{O}$).

Le calcium éventuellement nécessaire est apporté par un peu de chaux ou mieux, d'un sel de calcium soluble (nitrate, chlorure); il faut en ajouter de manière à saturer le milieu en calcium à pH voisin de 10, mais pas plus, c'est-à-dire jusqu'à formation d'un léger louche blanc.

On notera la possibilité d'apporter plusieurs éléments à la fois par le même produit, par exemple N et K par le nitrate de potasse, P et K par le phosphate dipotassique, ou S et Mg par le sulfate de magnésium.

Le fer est généralement apporté par une solution de sulfate de fer acidulé.

Ne pas utiliser les engrais agricoles ordinaires prévus pour être peu solubles, mais seulement les engrais solubles ou les produits chimiques purs correspondants. En cas de doute, analyser la spiruline produite pour vérifier qu'elle ne contient pas trop de métaux lourds (48).

Voici un exemple d'analyse de milieu de culture dans un bassin en cours de production :

Carbonate = 2800 mg/l	Potassium = 642 mg/l
Bicarbonate = 720 mg/l	Magnésium = 10 mg/l
Nitrate = 614 mg/l	Calcium = 5 mg/l
Phosphate = 20 mg/l	Ammonium + ammoniac = 5 mg/l
Sulfate = 350 mg/l	Fer = 1 mg/l
Chlorure = 3030 mg/l	Salinité totale = 12792 mg/l
Sodium = 4380 mg/l	Alcalinité = 0,105 N (molécule-gramme/l)

Densité à 20°C = 1010 g/l

PH à 20°C = 10,4

Le milieu doit contenir en plus tous les oligoéléments nécessaires, apportés généralement par l'eau et par les impuretés des sels. Un peu d'argile peut être un complément utile.

Voici une formule pour milieu de culture neuf (pH proche de 8) convenant pour des eaux de faible dureté :

Bicarbonate de sodium = 8 g/l

Chlorure de sodium = 5 g/l

Nitrate de potassium = 2 g/l (optionnel mais assure une réserve d'azote et de potassium)

Sulfate dipotassique = 1 g/l (optionnel)

Phosphate monoammonique = 0,08 g/l

Sulfate de magnésium $MgSO_4, 7H_2O$ = 0,16 g/l

Chaux = 0,010 g/l

Urée = 0,015 g/l

Solution à 10 g de fer/litre = 0,1 ml/l

b. Et en absence de tout produit chimique?

Dans ce cas, ou si l'on veut produire une spiruline "100% biologique", utiliser des produits naturels. Par exemple on peut utiliser de la lessive de cendres de bois, et tout le reste peut être remplacé par 4 ml d'urine par litre, plus le sel et, si nécessaire, du fer. Si l'urine est proscrite on a recours à la poudre d'os calcinés (46).

En Afrique certaines parties des palmiers sont particulièrement riches en potasse et servent traditionnellement à l'extraction de potasse. Pour fabriquer la lessive de cendre, on utilise par exemple le dispositif suivant: une bassine à fond percé, une couche de cailloux sur le fond, une toile, et 30 à 50 cm de cendre dans la toile; on verse l'eau sur la cendre (environ 5 litres d'eau par kilo de cendre, plusieurs fois) et on la fait percoler à travers la couche de cendre; au début le jus coule concentré et très caustique; s'en protéger car il attaque rapidement la peau et ne doit jamais atteindre les yeux. On peut recycler les premiers jus. Jeter la vieille cendre quand elle est épuisée et recommencer avec de la neuve. Attendre une quinzaine de jours que la carbonatation de la lessive se fasse à l'air, dans un bassin d'environ 15 cm d'épaisseur de liquide. Pendant cette période, agiter en remuant de temps en temps. Le temps de carbonatation étant inversement proportionnel à l'épaisseur, si l'on veut aller plus vite il suffit d'étaler la solution en couche plus mince; Mesurer la salinité ou mieux l'alcalinité. Diluer et saler: La dilution normale est à 8 g/l de sels de cendres plus 5 g/l de sel de cuisine. Ne pas oublier de rajouter du fer.

Pour mieux comprendre, voici un exemple donnant un milieu de culture pour 4 m², prêt à êtreensemencé:

- Lessiver 20 kg de cendres avec 3 fois cent litres d'eau
- Carbonater la lessive à l'air quinze jours sous faible épaisseur
- Diluer à densité (20°C) = 1,005 avec 300 litres d'eau
- Saler avec 3 kg de sel
- Ajouter 2 litres d'urine et 80 g de "sirop de fer"

c. Renouvellement du milieu de culture

Le milieu de culture doit rester peu coloré et peu trouble pour assurer la meilleure marche.

Normalement les bactéries et le zooplancton se chargent de la minéralisation et du recyclage des déchets biologiques. Mais il peut arriver que la production de déchets dépasse leur élimination, il se peut aussi que le milieu s'épuise en oligoéléments ou que la salinité ait tendance à devenir trop élevée: il faut alors remplacer le milieu de culture ou pratiquer une purge. Cette purge se fait par le fond (par pompage ou siphonnage) en éliminant en même temps des boues ou lors des récoltes. Remettre dans le bassin la quantité de sels contenus dans la purge. Si un bassin s'avère trop riche en un élément (urée mise en excès par exemple) et si son niveau est suffisamment bas, on peut lui ajouter du milieu neuf privé de l'élément en trop, de manière à diluer celui-ci.

La marche sans renouvellement du milieu de culture pendant plusieurs années est possible si les oligoéléments sont régulièrement apportés et si la productivité n'est pas excessive par rapport à la profondeur de culture. Dans la pratique cependant un certain taux de renouvellement aide à maintenir négligeable la concentration en contaminants éventuels (chimiques ou biologiques) et à assurer l'alimentation en oligoéléments (par les traces contenues dans l'eau d'appoint ou les sels). Il est sage de tabler au minimum sur un renouvellement tous les 2 kg de spiruline produite par m² de bassin, soit tous les 18 mois, progressivement (48).

d. Epuration et recyclage

Le plus simple, au niveau artisanal, est de majorer la surface et/ou la profondeur des bassins pour y réaliser l'épuration biologique "in situ", au prix d'une productivité éventuellement un peu plus basse, mais avec un taux de purge du milieu très faible, voire nul. A Antsirabe qui est une zone tempérée, le milieu de culture s'autopurifie très nettement pendant l'hivernage.

e. Stockage de milieu de culture neufs

Il n'est pas recommandé de stocker du milieu de culture neuf même à l'abri de la lumière, car il constitue par nature un "bouillon de culture" où pourrait se développer des microorganismes ou algues indésirables (47).

4. Ensemencement

a. Quelle souche de spiruline utiliser?

Il existe des spirulines de souches différentes, bien qu'elles aient toutes des caractères communs qui les distinguent des autres algues. On reconnaît très vite au microscope ou même à la loupe de fort grossissement (25 fois) si les spirulines sont spiralées ou droites mais il est moins facile de dire de quelle souche il s'agit car les spirulines ont une forte tendance à changer de taille et de forme. En présence de formes droites il existe un doute : s'agit-il de spirulines ou d'algues *Oscillatoria* semblables aux spirulines droites et dont certaines sont toxiques ? Prendre de préférence une souche 100 % spiralée, de grande taille, d'un beau vert tirant vers le bleu-vert, filtrant facilement, et à forte teneur en acide gamma-linolénique. On peut se procurer des souches pures à l'Institut Pasteur ou encore chez Antenna Technologie à Genève. Toutes sont en fait des "*Arthrospira platensis* spp" selon la dénomination scientifique. Nous appelons "spiralées" les souches dont les filaments sont en "queue de cochon", telle la "Lonar".

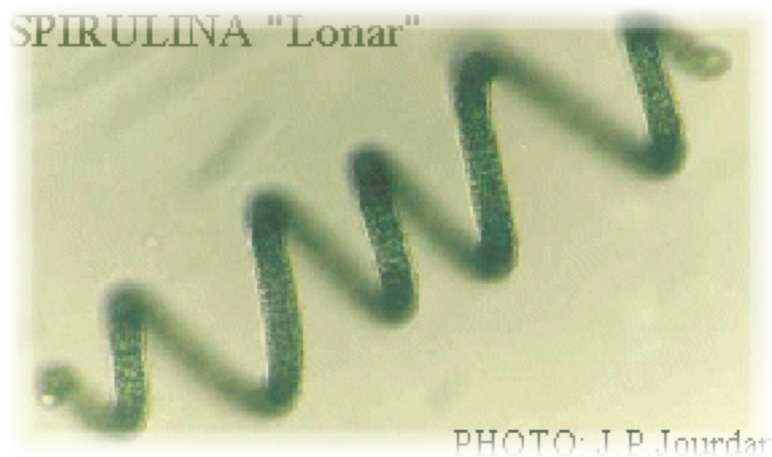


Figure 11 : Photo de *Arthrospira platensis* variété lonar au microscope (47)

Pour faciliter le choix de la souche, voici quelques éléments utiles:

- Les spiralées flottent plus que les ondulées et les droites, ce qui permet éventuellement leur séparation.
- Les spiralées ont plus tendance à former des peaux et grumeaux verts flottants, surtout à pH bas et en l'absence d'ammonium, ce qui est un inconvénient.

- La teneur en matière sèche dans la biomasse essorée prête au séchage est plus élevée chez les ondulées et les droites que chez les spiralées.
- La biomasse des spiralées sèche plus vite.

Il n'y a pas de différences de composition ou de valeur nutritionnelle notables entre ces souches, par contre la couleur verte des ondulées est plus sombre; certains préfèrent la couleur et la saveur de l'une ou l'autre souche, mais ceci est affaire de goût personnel.

b. Ensemencement à partir d'une petite quantité de culture

Pour implanter une culture de spiruline dans un site qui en est dépourvu, ou pour redémarrer avec une nouvelle souche, il n'est généralement pas possible de disposer d'une grande quantité de culture pour ensemer. Fréquemment on ne dispose que d'un flacon rempli à moitié seulement (pour maintenir assez d'oxygène). Ou bien on doit même partir d'un seul filament isolé. Supposons que le point de départ soit 150 g de culture à 1 g/l de concentration en spiruline et que l'objectif soit de multiplier le volume de semence initial pour ensemer un bassin de 1000 litres. Il va falloir faire au moins 4 cultures successives, en multipliant chaque fois le volume par 5, ce qui demande environ trois semaines au total (avec un taux de croissance de 35 %/jour, facile à obtenir avec du milieu de culture à base de bicarbonate). La première mini-culture se fera dans un bocal de deux litres, la seconde dans une bassine de 10 litres, la troisième dans une bassine de 50 litres, la dernière dans un mini bassin provisoire en film plastique de 1 m² (ou plusieurs grandes bassines).

L'agitation continue des cultures en petits récipients (bouteilles, seaux, bassines par exemple) se fait au moyen d'un petit bullage d'air comme dans un aquarium et nécessite un rapport hauteur de liquide/diamètre élevé, égal ou supérieur à 1, avec si possible un fond conique, le tube d'amenée d'air débouchant tout près du fond (il existe des compresseurs d'aquarium fonctionnant sur pile électrique). Il est pratique de chauffer et éclairer simultanément les petites cultures initiales en laboratoire par des lampes à incandescence ou halogène placées à la bonne distance pour maintenir automatiquement environ 35°C dans la culture.

L'agitation de volumes importants (> 100 litres) de cultures diluées peut se faire au moyen d'une petite pompe d'aquarium, mais on a intérêt à ne pomper qu'un quart d'heure par heure pour ne pas abîmer les spirulines, donc à utiliser un

programmeur à horloge. Les souches non spiralées sont beaucoup moins sensibles aux dégâts provoqués par les pompes.

Pour éviter la formation de grumeaux (surtout avec les souches spiralées et s'il n'y a pas d'agitation continue) au début de l'ensemencement, il faut diluer très progressivement la semence concentrée, en ajoutant des petites doses de milieu de culture neuf à base d'urée, par exemple à chaque agitation, en gardant une concentration élevée en spirulines les deux premiers jours. On a ensuite intérêt à conserver une concentration en spiruline élevée (0,3 g/l ou plus) et donc à diluer le moins possible la culture à chaque augmentation de volume: une dilution progressive (par exemple quotidienne) est la meilleure. On peut pour cela utiliser un "bassin à géométrie variable", extensible en surface, facile à réaliser avec du film plastique. Chaque augmentation de volume (donc surface) se fait par dilution à l'aide de milieu de culture neuf (48).

Il est important de connaître les informations suivantes :

- Une culture peut mourir suite à une dilution, un éclairage ou un chauffage trop forts, ou un excès d'urée.
- L'augmentation de niveau d'un bassin doit se faire par ajout de milieu de culture. L'ajout directement dans le bassin des sels non dissouts peut être très dangereux pour la culture.
- Si on prépare d'avance une réserve de milieu de culture de dilution, la garder fermée et à l'obscurité pour qu'elle ne risque pas de se contaminer par des algues indésirables.

c. Taux de croissance initial

La vitesse de croissance dépend du pH. Elle est maximum à pH inférieur à 10, donc on a intérêt à utiliser du bicarbonate pour démarrer rapidement une nouvelle culture. On a aussi intérêt à maximiser la surface de culture (donc bassin peu profond si possible). La méthode d'extension progressive de la surface de bassin favorise une croissance rapide. On caractérise au mieux la rapidité d'implantation d'une nouvelle culture en calculant le taux de croissance exponentielle dans la phase initiale de croissance qui précède la phase des récoltes. Ce taux s'exprime en % par jour. Dans des conditions favorables, en milieu à base de bicarbonate, il peut dépasser 30%/jour. A partir d'un gramme de semence (exprimé en spiruline sèche), un taux de

20%/jour permet d'obtenir 20 m² de bassin de 15 cm de profondeur prête à la récolte en 40 jours, ou 120 m² en 50 jours. D'une manière générale il ne faut pas soumettre les spirulines à plus de 16 heures d'éclairage par jour (46).

d. Réserve de semences

En temps normal les bassins eux-mêmes servent de réserve s'ils restent en bonne santé et sans contaminant, mais il faut prévoir les accidents et comment passer la mauvaise saison éventuelle. On a aussi intérêt, parfois, à vidanger complètement les bassins et à les redémarrer à zéro pour assurer le maintien d'une bonne qualité de spiruline (sans contaminant, sans droites, filtrant bien). Pour cela il faut disposer de semence pure. Il est donc recommandé de conserver un peu de souche pure "en laboratoire" (= dans la maison), à température modérée ou ambiante, sous faible éclairage environ 12 heures/jour (en l'absence totale de lumière la spiruline meurt en quelques jours, par exemple en 2 jours à 35°C), légèrement agitée, et renouvelée ("repiquée") tous les 2 ou 3 mois : dans ces conditions, elle se conserve bien alors qu'en culture trop intensive elle a tendance à muter et peut dégénérer. Une bouteille en verre ou en plastique convient très bien comme récipient.

Pour agiter et aérer, le plus pratique est un petit compresseur d'air électrique pour aquarium, qu'on peut ne faire marcher que de temps en temps grâce à un programmateur (il existe de tels compresseurs et programmateurs fonctionnant sur courant continu). Pour à la fois éclairer et chauffer la culture il suffit d'une lampe de chevet de 40 Watt dirigée horizontalement vers la bouteille, à la distance donnant une température correcte (< 30°C).

Pour conserver des quantités plus importantes de semence, on utilise des bassines ou aquariums, avec des lampes plus puissantes, à incandescence ou halogènes; les tubes luminescents chauffent peu et conviennent si la température ambiante est suffisamment élevée (48).

e. Cahier de conduite et entretien de la culture

Globalement, différents paramètres sont importants pour une culture réussie et un rendement optimal : agitation des bassins, l'évolution du pH, l'ombrage, le niveau d'eau.

Il faut contrôler la quantité de fer et d'oligoéléments.

Il est important de surveiller la contamination par de petits animaux, des algues indésirables et des microorganismes.

La vigilance doit être renforcée sur l'empoisonnement chimique éventuel et éviter l'hypoxie.

5. Récolte

Il vaut mieux récolter le matin car la teneur de la spiruline en protéines y est généralement plus élevée que le soir, mais aussi pour d'autres raisons: chaleur excessive ensuite, nécessité de mettre la récolte à sécher dès que possible (surtout en cas de séchage solaire si le beau temps n'est pas assuré l'après-midi).

La filtration sous plein soleil est fortement déconseillée car la biomasse sur les bords du filtre devient rapidement brune et salit la toile de filtration, il existe un risque de photolyse. Par temps couvert cette obligation de récolte tôt le matin est évidemment moins impérieuse, et par beau temps on peut toujours ombrer le filtre.

Quelque soit le temps, si l'on opère en plein air, il faut couvrir le filtre pour éviter que la biomasse récoltée ne se salisse. Quand cela est possible il est très avantageux d'aménager un poste de récolte à l'abri du soleil et des poussières, de préférence dans un bâtiment. Des pompes agitent les bassins car la spiruline a besoin d'agitation pour croître, néanmoins au moment de la récolte et de la filtration, mieux vaut homogénéiser la culture mais laisser seulement décanter les boues 5 minutes avant (47).

a. Filtration

La récolte consiste à filtrer une partie de la culture sur une toile fine (maille de 25 à 60 μ), en recyclant le filtrat dans le bassin. La culture est envoyée au filtre à travers un tamis de maille 300 μ destiné à intercepter les corps étrangers tels qu'insectes, larves, feuilles, boues ou grumeaux de spirulines. Un tamis de maille plus fine peut être nécessaire pour arrêter d'éventuels rotifères (l'ouverture de maille est choisie pour ne pas arrêter trop de spirulines).

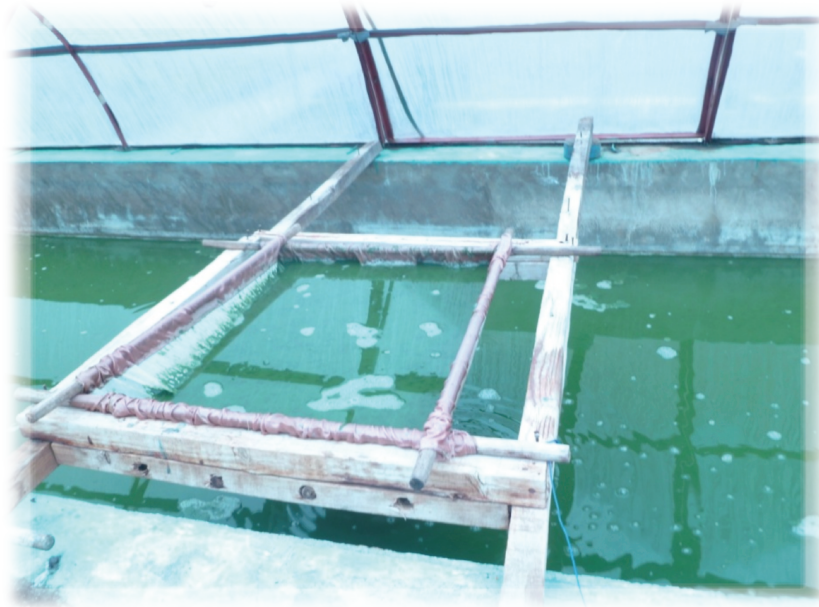


Figure 12 : Photo de filtration sur tamis de maille fine

La toile de filtration peut être simplement posée sur un grand tamis à bords de 10 cm de haut. Il faut que la toile de filtration soit tendue pour faciliter son décolmatage avec une pelle à bord droit et aussi pour ramasser la biomasse si elle colle.

On peut pomper la culture (pompe d'un type ne cassant pas les spirulines : vérifier au microscope) de toutes façons il faut veiller à ne pas remuer trop le fond du bassin, pour ne pas mettre en suspension les boues du fond, lors du prélèvement. Bien que le tamis arrête les boues les plus visibles, de fines particules sont cependant presque toujours entraînées dans la spiruline récoltée: il s'en dépose dans le tissu à l'endroit de l'arrivée de culture à filtrer (s'il y en a beaucoup, la toile, surtout de maille fine, se colmatera assez vite et l'on peut être amené alors à la nettoyer au jet d'eau en cours de récolte). On facilite la filtration, lorsqu'une couche de biomasse s'est formée sur la toile, en raclant la toile pour la décolmater : on utilise pour cela un ustensile type pelle.

Après arrêt de l'envoi de culture sur le filtre (éviter d'abaisser la concentration en spirulines en dessous de 0,4 g/litre), on laisse égoutter puis on rassemble la pâte verte obtenue, dite « biomasse ». Ici, nous sommes en présence d'un type de biomasse riche en spirulines droites ou ayant eu une croissance trop rapide ou trop riche en matières organiques dissoutes qui ne forme pas de boule et colle au plastique, on obtient donc une « crème » collante qu'on doit ramasser à la louche et qui ne peut pas s'essorer.



Figure 13 : Photo du ramassage de la biomasse à la louche

Une diminution de la taille des spirulines peut être provoquée par une vitesse de croissance très rapide ou une salinité ou un pH trop élevés, ou provenir de la souche, ou d'une trop forte luminosité. Dans ce cas, utiliser une toile de maille fine (25 à 35 microns), sinon il y aura des fuites importantes de spirulines à travers la toile surtout lors des décolmatages, d'où un mauvais rendement de filtration et une sélection aboutissant à enrichir le bassin en spirulines de plus en plus petites. Une vitesse de filtration considérée comme bonne fournit de l'ordre de 300 g de spiruline sèche/heure/m² de surface filtrante (47).

b. Lavage et essorage

Les spirulines ne peuvent être lavées qu'avec du milieu de culture neuf à la même salinité que le bassin récolté. En effet les spirulines mises en contact avec un milieu de salinité différente de leur milieu d'origine réagissent et leur paroi éclate.

Une biomasse provenant d'une culture en bon état n'a nul besoin d'être neutralisée ni lavée, seulement essorée autant que faire se peut car l'essorage est nécessaire en l'absence de lavage. L'essorage se pratique simplement par pression grâce à un presseur à vis supérieure en inox qui est pratique et propre.



Figure 14 : Photo d'un pressoir en inox

On applique une pression modérée et progressive et on laisse agir plus longtemps (30 minutes) : on obtient ainsi une biomasse extrudable.

Attention la biomasse non essorée ou non lavée à l'eau brunit rapidement au soleil (48).

c. Lavage des outils

On a intérêt à rincer dès que possible, ou au moins à mettre à tremper, les outils, toiles, récipients, instruments ayant été en contact avec la spiruline; sinon, si la spiruline sèche avant nettoyage, elle devient très difficile à nettoyer et il peut s'ensuivre une consommation d'eau de lavage exagérée et ici l'économie d'eau est primordiale. Les toiles de filtration et de pressage doivent être lavées et séchées après usage pour garder leur efficacité et éviter qu'elles ne prennent des odeurs; attention: pour qu'elles durent longtemps, ne pas les exposer trop au soleil.

6. Séchage et broyage

Le séchage est le seul moyen sûr de conserver et de distribuer la spiruline sans chaîne de froid. Si la spiruline pressée ne peut être séchée de suite, il faut la conserver en récipient fermé au réfrigérateur bien froid. Au village d'Antsirabe, il n'y a pas de réfrigérateur, la spiruline est donc séchée rapidement et en plein air.

a. Extrusion

Le séchage doit être suffisamment rapide pour que le produit sèche sans fermenter. La biomasse issue du pressage est d'abord répartie par extrusion en "spaghetti" sur une grille en plastique (à maille de l'ordre de 5 mm).

L'extrusion en spaghetti se fait à l'aide d'un instrument coûteux : un pistolet à silicone Sika.

En déposant les spaghettis sur le support (plateau de séchage) éviter de former de gros amoncellements de biomasse, qui ne sécheraient pas assez vite.

Sur un plateau de séchoir électrique Stöckli, pour l'extrusion on utilise un pistolet à colle en poches type Sika ("saucisson" en langage Sika Canada) de 600 ml de capacité, actionné par air comprimé. Le chargement du pistolet est instantané grâce au conditionnement de la biomasse en saucisses identiques aux poches de colle.



Figure 15 : Photo de l'extrusion de biomasse pressée, avec pistolet à silicone Sika (47)

b. Séchage

Le séchage au soleil en plein air est le plus rapide et le moins coûteux, mais il a des inconvénients : le produit est exposé aux poussières et aux animaux (il faut au minimum le protéger par une moustiquaire), et il risque de bleuir en surface par destruction de la chlorophylle par les ultra-violets ; après broyage ce bleuissement n'est plus perceptible, mais une altération du goût reste sensible. Ce type de séchage réussit bien si les conditions sont bonnes pour un séchage très rapide: s'il est suffisamment rapide ou si la lumière solaire est suffisamment pauvre en ultraviolets, l'altération de la couleur et du goût peut être imperceptible.

Un séchoir électrique pour fruits et légumes, comme l'appareil suisse de marque Stöckli, de puissance 450 Watt, avec plateaux de 30 cm de diamètre, a une capacité moyenne de séchage de 20 g (compté en sec) par heure. Son débit d'aération est faible. On voit l'intérêt de limiter le nombre de plateaux superposés et de ne pas

gêner le débit d'air (maintenir propres les filtres ou moustiquaires protégeant l'entrée et la sortie de l'air de l'appareil) (47).



Figure 16 : Photo d'un séchoir électrique type Stöckli

Dans la pratique, avec les séchoirs Stöckli, qui ont un faible débit d'air, nous limitons absolument le nombre de plateaux à 5 et leur charge individuelle à 2 kg de biomasse fraîche par m² de plateau (soit 150 g/plateau).

Si l'on charge trop de biomasse fraîche par rapport au débit d'air, ou si la biomasse est trop molle, ou si le temps est trop humide, ou si le thermostat est réglé trop bas, le séchage ne se fait pas assez rapidement, la spiruline commence à se détériorer avant d'être sèche, elle dégage une odeur anormale ("butyrique") et parfois les "spaghetti" s'aplatissent ("fondent"), restent comme du plastique mou et ne se décolle pas du plateau. Dans ces cas, il vaut mieux réserver le produit à l'alimentation animale ou le jeter. Une spiruline mal séchée est généralement trop molle pour pouvoir être broyée, ce qui est un indice, mais attention: il arrive que l'on ne s'aperçoive pas qu'une détérioration a eu lieu car le produit peut quand même paraître sec et bien vert en surface alors qu'il est mou et noirâtre à l'intérieur, ou bien il a pu changer de couleur et finir par sécher quand même ; il est donc important de vérifier la qualité du produit sec d'après son odeur et son goût et de le piquer avec

une pointe de couteau pour vérifier s'il est dur et vert à cœur. Le dégagement d'odeur en début de séchage ne signifie pas forcément que le produit sec soit de mauvaise qualité ou de mauvais goût.

A Antsirabe la spiruline est séchée sous un débit d'air faible (en séchoir Stöckli) à 65°C, assurant l'extraction de l'eau jusqu'à 4 % d'eau en une demi-heure.

Le séchage du premier stade a été réalisé autour d'un ventilateur de 50 W de diamètre 30 cm correspondant à celui des plateaux Stöckli qui sont posés dessus. Ce ventilateur aspire à travers un filtre à poussières (ouate synthétique vendues pour garnir les hottes de cuisine) un air préchauffé par un radiateur électrique soufflant (1 à 2 kW). Le premier stade suffit lorsque l'air est sec (séchage à moins de 9 % d'eau en 4 heures).

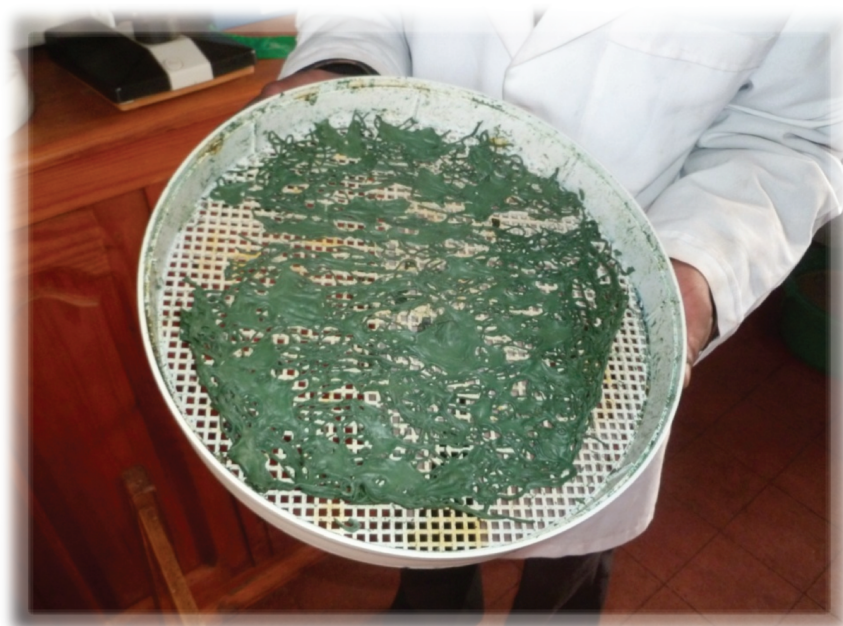


Photo 17 : Photo de la spiruline extrudée et séchée

Le test de fin de séchage est réalisé par des programmes informatisés fournis par Antenna technologies tenus secrets.

Au cas où le séchage a été insuffisant il est possible de le compléter soit par un nouveau passage au séchoir à 65°C (en mettant le produit sur des assiettes s'il a

déjà été broyé), soit de préférence en l'enfermant dans un récipient étanche avec un sachet déshydratant.

c. Broyage

La spiruline bien séchée est craquante, se détache toute seule du support de séchage et se laisse facilement piler ou broyer en une poudre fine.

La densité apparente de la spiruline extrudée, séchée et broyée est de 0,66 kg/litre. Elle doit contenir moins de 9 % d'eau pour bien se conserver.



Figure 18 : Photo de spiruline broyée

7. Conditionnement

La spiruline sèche peut se conserver longtemps sans perdre ses qualités à condition d'être stockée en sachets bien remplis et étanches, à l'abri de la lumière, de l'air (emballage plastique et thermoscellé pour éviter la pénétration de l'oxygène), et des fortes chaleurs. Il est préférable de faire le vide dans le récipient tout en le thermoscellant (des appareils commerciaux existent pour cela): dans ce cas le produit peut se conserver 5 ans.

Si on ne peut pas sceller sous vide, l'absorption de l'oxygène restant dans le sachet convenablement scellé provoquera souvent sa mise sous vide spontanée en quelques jours si le récipient est bien scellé; cette absorption d'oxygène s'accompagne de la destruction d'une fraction des composants oxydables de la spiruline, comme le bêta-carotène, mais cette fraction "sacrifiée" reste faible s'il y avait peu d'air résiduel (47).

Il faut conserver ces sachets de spiruline en lieu sûr car les rongeurs les percent volontiers.



Figure 19 : Photo de sachets étanches et thermoscellés en lieu sûr.

8. Contrôle de qualité

Le séchage à basse température (40 à 50 °C) a l'avantage de mieux préserver la qualité nutritionnelle du produit et donne déjà un produit généralement correct du point de vue bactériologique. Aucun microorganisme dangereux ne peut survivre longtemps dans un produit à moins de 9 % d'eau correspondant à une activité de l'eau inférieure à 0,5 (< 50 % d'humidité relative dans l'air à l'équilibre avec le produit à 25°C). La spiruline ne contient en principe pas de spores à cause du pH du milieu de culture. La qualité microbiologique s'améliore au stockage. Le stockage en sachets scellés permet une vérification a posteriori de la qualité du séchage : si le vide se forme, c'est que le produit était correct ; si le sachet se gonfle (cela peut demander quelques mois), c'est qu'il y a fermentation.

En cas de doute sur la qualité bactériologique ou le degré de séchage de la spiruline séchée, il est possible de la chauffer à 120°C dans un four. Mais la chaleur sèche ne stérilise pas bien et ne détruit pas les spores de bactéries ni les toxines éventuellement présentes. C'est pourquoi il demeure nécessaire de travailler en respectant au moins les règles d'hygiène classiques (ne pas toucher le produit avec les mains, travailler loin du sol, avec des instruments et récipients en inox ou plastique, etc.), et il est bon de faire vérifier de temps à autre la conformité du produit par rapport aux normes bactériologiques en vigueur (49).

**PARTIE III : PLACE DE LA SPIRULINE DANS LE
TRAITEMENT DE LA CACHEXIE : OBSERVATION DE SON
UTILISATION DANS LES VILLAGES DE L'ASSOCIATION
« LES ENFANTS DU SOLEIL »**

I. Généralités sur la cachexie

1. Définition de la cachexie

Du grec « kakos » qui signifie mauvais et de « hexis » qui signifie disposition, la cachexie est une dégradation profonde de l'état général, accompagnée d'une maigreur importante. C'est une dénutrition sévère associée à la fonte des muscles et du tissu graisseux.

On peut classer la malnutrition infantile en deux types : le marasme et le kwashiorkor (50).

2. Etiologies

La cachexie a des causes multiples. Certains facteurs en sont directement responsables, d'autres, comme les maladies infectieuses, ne le sont qu'indirectement, mais l'accentuent.

a. Production ou consommation insuffisante

Les carences alimentaires peuvent être dues au manque de nourriture, à la mauvaise qualité des terres cultivables et à l'éloignement des terres de culture par rapport au village.

Le manque de moyens de production, les mauvaises conditions climatiques, ainsi que l'absence de conservation des aliments sont également des facteurs aggravants.

Enfin la mauvaise organisation des circuits de distribution alimentaire et la pauvreté limite la consommation des aliments (51).

b. Facteurs socioculturels

En outre, dans certains pays, la valeur symbolique attachée à certaines ressources alimentaires interdit l'accès à celles-ci, comme le porc par exemple.

Dans d'autres, les coutumes empêchent la consommation d'un certain nombre d'aliments pendant la période d'allaitement (exemple : œuf, viande de poule, viande de porc, poissons). Ces traditions réduisent la possibilité de varier le régime et entraînent un déséquilibre alimentaire (50, 51).

c. Facteurs infectieux

Il existe un lien indéniable entre infection et cachexie.

Les maladies se déclarent facilement chez les jeunes enfants et ceux-ci y résistent d'autant moins bien qu'ils sont malnutris.

Les infections provoquent aussi la cachexie car à ce stade, l'usure de l'organisme augmente les besoins en protéines. L'apparition de vomissements, de diarrhée, suite à des maladies comme la rougeole, la coqueluche ou des maladies broncho-pulmonaires aggrave l'état du patient déjà critique (52).

3. Les différentes formes de malnutrition

Un enfant ne recevant pas suffisamment de nutriments dans son alimentation quotidienne est exposé à différentes formes de malnutrition.

a. Malnutrition protéino-énergétique

Ce type de malnutrition porte principalement sur les apports en énergie et en protéines.

Elle résulte de l'interaction de plusieurs facteurs :

- une alimentation insuffisante sur le plan quantitatif et inadaptée au besoin de l'enfant sur le plan qualitatif,

- des infections répétées : diarrhée, infection respiratoire, rougeole.

Ces infections créent un état de malnutrition car elles augmentent les besoins de l'enfant en protéines à cause de la fièvre et elles diminuent l'absorption digestive de nutriments (diarrhée). Il faut garder en mémoire qu'en moyenne un enfant né dans un Pays en Voie de Développement fait trois épisodes de fièvre ou de diarrhée chaque mois au cours des deux premières années.

L'insuffisance en apport énergétique est le facteur le plus fréquent de la malnutrition. Vient ensuite l'insuffisance en apports en protéines, en termes de quantité mais aussi de qualité (par défaut de certains acides aminés dits essentiels).

A ce déficit en énergie et en protéine s'ajoutent souvent des carences en fer, en vitamine A et en vitamine du groupe B (54).

b. Anémie nutritionnelle

Ce déficit résulte d'une carence en fer.

c. Carence en vitamine A

Les manifestations de cette carence portent le nom de xérophtalmie.

Parfois, l'enfant peut être victime en même temps de ces trois formes de malnutrition à des degrés divers.

d. Marasme et kwashiorkor

C'est à l'âge préscolaire entre 2 et 5 ans que la malnutrition est la plus marquée par les raisons suivantes :

- les besoins en nutriments de ces enfants (en tenant compte de leur poids) sont très élevés comparés à ceux d'enfants plus âgés.

- les bouillies traditionnelles qui leur sont proposées (à base de riz) ne sont pas suffisamment « nourrissantes ». Elles apportent une densité calorique trop faible compte tenu du volume de l'estomac de l'enfant.

Les besoins en protéines sont de l'ordre de 20 g j⁻¹ entre 1 et 3 ans. Les sources de protéines (lait, viande ou œuf) ne sont pas à la portée des familles démunies, donc indisponibles pour les enfants malnutris.

- l'enfant à cet âge est de plus en plus exposé à des sources d'infections contre lesquelles il ne dispose pas encore de protection immunitaire. D'où la fréquence des épisodes de diarrhées fébriles.

A chaque épisode infectieux, il réduit sa prise alimentaire qui est déjà insuffisante en temps normal. Si rien n'est fait pour stopper cette dégradation, le marasme ou kwashiorkor va apparaître (51).

Le marasme est la forme la plus commune de la malnutrition grave. L'enfant semble n'avoir que la peau et les os. La fonte musculaire est évidente, la graisse sous cutanée a disparu.

Cet aspect du marasme est le résultat d'épisodes répétés de diarrhées et d'autres infections ou d'un allaitement maternel trop prolongé sans alimentation complémentaire adéquate.

Il résulte d'un apport insuffisant en calories et en protéines. Cette forme de malnutrition est celle observée dans l'association « les enfants du soleil » chez les nouveaux arrivants.

Le kwashiorkor résulte principalement d'une carence protéique. Cette forme de malnutrition est moins fréquente que le marasme. Les signes physiques principaux

sont : un visage pâle, des œdèmes aux membres inférieurs et supérieurs et un ventre ballonné. Ce type de malnutrition ne peut se traiter efficacement sans intervention médicale.

On estime que 20 millions d'enfants de moins de 5 ans dans le monde sont atteints de malnutrition aiguë sous forme de kwashiorkor ou de marasme. Les plus touchés sont les enfants âgés de un an (après sevrage) à 3 ans (54).

II. Traitement de la cachexie

Le traitement de la cachexie implique une alimentation spéciale et un plan de réhydratation. Une observation médicale est nécessaire pour prévenir et gérer les complications de la malnutrition.

Pour évaluer les besoins nécessaires, il faut connaître les apports nutritionnels conseillés.

1. Apports nutritionnels conseillés

La détermination des Apports Nutritionnels Conseillés (ANC) ainsi que leur comparaison avec les apports de la spiruline constituera une étape indispensable pour l'évaluation de la couverture des besoins physiologiques.

Cette évaluation se fera sur la base des besoins de l'enfant de 1 à 3 ans et de la femme allaitante.

Ces deux groupes d'individus étant ceux pour lesquels les besoins physiologiques en nutriments sont les plus importants.

L'enfance est en effet une période primordiale où l'apport en nutriments se doit d'être riche tant quantitativement que qualitativement afin de minimiser tout risque de malformation ou de problèmes mentaux pendant la croissance.

Concernant la femme allaitante, ses besoins nutritionnels sont augmentés durant l'allaitement et tout manque en nutriment peut avoir des conséquences potentiellement graves sur le développement du nouveau-né.

Les ANC sont des paramètres non évalués à Madagascar, nous ne possédons pas les données pour ce pays. Nous prendrons donc comme référentiel les ANC au sein de la population française (55).

En dessous des ANC, le risque de carence augmente de manière continue Au-delà, la possibilité d'une carence est voisine de zéro, bien qu'il existe un risque de

surdosage au-delà duquel peut apparaître la fonctionnalité négative du nutriment. Cependant, avant de dépasser cette limite, il existe une zone de sécurité très large, variable selon les nutriments.

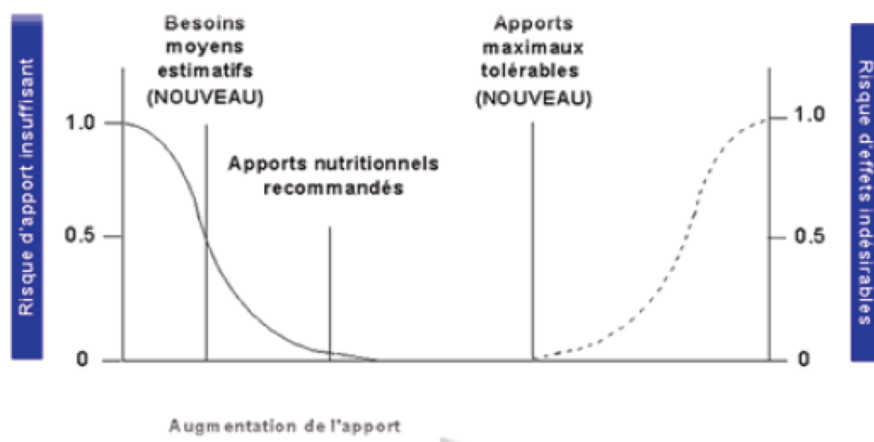


Figure 20 : Apports nutritionnels en nutriments et effets sur l'organisme (55)

2. Rôles des éléments nutritifs pour le fonctionnement du métabolisme humain

a. Rôle des protéines dans l'organisme

Les protéines sont indispensables à l'être humain car elles lui apportent des éléments essentiels à la vie : les acides aminés. Ceux-ci sont à la base des cellules qui composent notre corps.

Certains de ces acides aminés sont dits essentiels car l'organisme ne peut pas les synthétiser, seule l'alimentation peut les apporter. Leur rôle est multiple : la croissance, la reproduction, la nutrition, l'immunité (système de reconnaissance et de défense de l'organisme) leur sont liées. Les protéines jouent donc un rôle dans la défense de l'organisme qui les transforme en anticorps, elles sont aussi nécessaires à la fabrication des enzymes qui effectuent les réactions chimiques à l'intérieur de l'organisme.

Le corps humain crée constamment de nouvelles cellules c'est pourquoi il a sans cesse besoin de protéines car il ne peut en faire des réserves à la différence des lipides et des glucides (15).

Les principales sources de protéines dans notre alimentation sont : les viandes, les poissons, les œufs, les produits laitiers et les légumes secs.

Avec une teneur en protéines de 55 à 70 %, la spiruline est plus riche en protéines que la plupart des aliments courants. Pour comparaison, dans la viande et le poisson la moyenne est de 15-20 %, dans le soja, 35 % et les œufs, 12 %. D'un point de vue quantitatif, la spiruline est donc un aliment de choix pour un apport protéique majeur et d'autant plus que la digestibilité de ses protéines, accrue par l'absence de paroi cellulosique des cellules, s'élève entre 75 et 83%.

D'un point de vue qualitatif, les protéines de la spiruline sont complètes, car tous les acides aminés essentiels y figurent (excepté le tryptophane) et représentent entre 47 et 60% du poids total des protéines.

Bien que la composition en acides aminés de la spiruline soit idéale, pour devenir une source alimentaire de premier choix, il est nécessaire que ces protéines soient assimilables par l'organisme.

Cette caractéristique peut être déterminée par le calcul de l'efficacité protéique (PER). Ce PER se calcule comme le rapport « Gain de poids de l'animal ou de l'individu / poids de protéines ingérées ». Les protéines de références sont la lactalbumine ou la caséine, lesquelles présentent un PER de 2,5.

La spiruline seule, au cours d'expériences menées sur le rat, à un PER de 1,90, tandis qu'accompagnée de riz dans une proportion égale, cette valeur s'élève à 2,40. Ces résultats indiquent que la spiruline ou plus précisément ses acides aminés sont bien utilisés d'un point de vue métabolique et donc que cette cyanobactérie présente non seulement l'avantage d'avoir un contenu protéique riche mais l'avantage d'être facilement assimilable par l'organisme (56).

b. Rôle des lipides dans l'organisme

Les lipides ont un rôle énergétique, avec un rendement calorique de 9 kcal/g. Ils ont également un rôle structural essentiel en contribuant au maintien de l'architecture cellulaire (57).

La composition lipidique de la spiruline se caractérise d'une part par un bon équilibre acides gras saturés/acides gras insaturés et d'autre part, la présence d'acides gras polyinsaturés dits essentiels (AGE).

On range actuellement les acides gras essentiels en deux groupes : oméga-3 et oméga-6. Ces A.G.E contribuent à la synthèse des eicosanoïdes, tel que les prostaglandines, le thromboxane et les leucotriènes, médiateurs impliqués dans les processus immunitaires et inflammatoires (58).

Autre particularité d'*Arthrospira platensis*, la présence d'acide gamma-linoléique, acide gras à haute valeur alimentaire et rare dans les aliments courants.

Cet acide gras essentiel du groupe des oméga-6 est présent en quantité relativement élevée de 20,3 % à 40 %, soit environ 4 % du poids sec. La spiruline peut être considérée comme l'une des meilleures sources connues d'acide gamma-linoléique, après le lait humain et quelques huiles végétales peu courantes et onéreuses (huiles d'onagre, de bourrache et de chanvre).

Normalement synthétisé chez l'homme à partir de l'acide linoléique (oméga-6) d'origine végétale, l'acide gamma-linoléique peut être directement assimilé avec profit en cas d'insuffisance endogène.

La présence d'acide alpha-linoléique a été notée dans certaines études faisant aussi d'*Arthrospira platensis* une source d'oméga 3. La spiruline est une source potentielle en acides gras oméga 6 et oméga 3 et ceci a des taux suffisants pour jouer un rôle fonctionnel bénéfique pour la santé.

c. Rôle des glucides dans l'organisme

Les glucides, indispensables au fonctionnement des muscles et du cerveau, constituent la source d'énergie la plus rapidement utilisable par l'organisme et sont impliqués dans l'anabolisme des protéines. Les glucides ont donc un rôle essentiellement énergétique.

Certains glucides ont un rôle dit de "constitution". Ils rentrent dans la composition de tissus fondamentaux de l'organisme : les cartilages, les acides nucléiques, le mucus, les substances antigéniques.

Constituant une part importante de la matière sèche de la spiruline (15 à 25%), les polysaccharides qui la composent, offrent une énergie rapide sans stimuler fortement la sécrétion d'insuline. Les glucides simples sont eux en très faible quantité, ce qui est plutôt un avantage sur le plan diététique.

D'un point de vue plus thérapeutique, les polysaccharides de la spiruline présentent de multiples intérêts, notamment dans la stimulation des mécanismes de réparation de l'ADN, dans son effet radio protecteur et dans la neutralisation des radicaux libres.

Les glucides contenus dans la spiruline sont bénéfiques pour l'homme (58).

d. Rôle des vitamines dans l'organisme

Les vitamines sont des substances sans valeur énergétique mais vitales. A l'exception de deux d'entre elles (vitamines K et D), l'homme n'est pas capable de les fabriquer et leur apport par l'alimentation est primordial pour le fonctionnement harmonieux de l'organisme.

Contrairement aux macronutriments (protéines, glucides, lipides) elles exercent leurs actions à très faibles doses.

Le rôle d'un apport adéquat en vitamines dans la prévention de nombreuses pathologies (maladies liées au vieillissement, maladies cardiovasculaires, cancers)

est de plus en plus démontré, mais la surconsommation de vitamines peut avoir des effets néfastes à long terme.

On distingue deux groupes de vitamines : les vitamines hydrosolubles et les vitamines liposolubles (57).

- Rôle des vitamines hydrosolubles dans l'organisme

Les vitamines hydrosolubles sont solubles dans l'eau et ne sont pas stockées dans l'organisme (à l'exception de la vitamine B12) ; leurs apports doivent donc être assurés quotidiennement par notre alimentation.

Ces vitamines sont apportées par la quasi-totalité des groupes d'aliments (viande, poisson, œufs, produits laitiers, céréales, fruits et légumes). Ce groupe contient la vitamine A, la vitamine C et les vitamines du groupe B (B1, B2, B3 ou PP, B5, B6, B8, B9 et B12).

Elles sont impliquées dans de nombreuses fonctions biologiques : construction (croissance, développement du squelette), fonctionnement et entretien (transformation et utilisation des macronutriments, vision, coagulation du sang, systèmes musculaire, nerveux, immunitaire, fabrication d'ADN, antioxydants...).

Les vitamines hydrosolubles sont principalement les vitamines du groupe B. Les vitamines du groupe B sont des cofacteurs impliqués dans tous les métabolismes, la synthèse des hormones et des enzymes, la transmission de l'influx nerveux, la production d'énergie, le système immunitaire (59).

➤ *Vitamine B1*

La thiamine joue un rôle essentiel dans le métabolisme des glucides et celui de l'alcool. Le métabolisme de la vitamine B1 interfère soit directement, soit par l'intermédiaire de voies métaboliques plus ou moins complexes avec celui des vitamines B2, B6, PP, acide pantothénique et les folates.

Une carence en vitamine B1 est cause de béri-béri, cette maladie se caractérise par des symptômes neurologiques dans sa forme sèche ou cardiaques dans sa forme

humide. Le bériberi reste présent dans de nombreux pays où la dénutrition est présente.

➤ *Vitamine B2*

La vitamine B2 ou riboflavine intervient dans :

- le catabolisme des acides gras, celui de certains acides aminés et des bases puriques
- la transformation du succinate en fumarate (entrée dans le cycle de Krebs)
- la chaîne respiratoire

Une carence en vitamine B2 est exceptionnelle dans les pays développés. Elle est responsable de symptômes cutanéomuqueux (dermites, chéilite, stomatite) et de symptômes oculaires (sécheresse, infections cornéennes).

➤ *Vitamine B3*

Les fonctions biochimiques de la vitamine B3 ou PP ou niacine reposent essentiellement sur une action en tant que coenzyme. Elle intervient dans le mécanisme de respiration cellulaire. En synergie avec la vitamine B12, elle contribue aussi à la synthèse de l'ADN et de l'ARN et est donc indispensable à la fabrication des cellules sanguines. C'est une vitamine antianémique.

Une carence en niacine peut conduire à la pellagre.

➤ *Vitamine B6*

La vitamine B6 ou pyridoxine participe à de nombreux systèmes enzymatiques catalysant la synthèse et la dégradation des acides aminés, la synthèse des neurotransmetteurs, la dégradation du glycogène musculaire, le métabolisme du tryptophane et la synthèse de l'hème.

Une carence peut provoquer une hyper irritabilité et des convulsions épileptiformes chez les nouveau-nés.

➤ *Vitamine B9*

La vitamine B9 ou acide folique intervient dans le métabolisme des acides aminés (dont la méthionine à partir de l'homocystéine) et des acides nucléiques (acide thymidilique nécessaire à la production d'ADN).

Son rôle métabolique est donc essentiel pour les cellules à renouvellement rapide principalement. Elle est donc nécessaire à la formation des globules rouges, de certaines protéines et de matériel génétique contenu dans le noyau cellulaire.

Une carence peut aboutir à une anémie macrocytaire ou des problèmes liés à la formation du fœtus lors de la grossesse.

➤ *Vitamine B12*

La vitamine B12 ou cobalamine intervient dans la formation de l'ADN et des globules rouges sains. Elle participe également au maintien du système nerveux et est essentielle au maintien d'une bonne fonction mentale.

La carence en vitamine B12 (anémie pernicieuse) provient soit d'un défaut d'apport alimentaire en cette vitamine (cas de régimes végétaliens stricts) soit d'un défaut d'absorption.

➤ *Vitamine C*

La vitamine C intervient dans deux grands types de réactions :

- les réactions d'hydroxylation d'une part, nécessaires à la synthèse du collagène (hydroxylation de la lysine et de la proline), des catécholamines (DOPA et noradrénaline) et de la carnitine essentiellement
- les réactions d'oxydoréduction d'autre part, où elle joue principalement un rôle réducteur (réduction des nitrites et du fer ferreux...). De plus elle intervient dans les réactions radicalaires, comme piègeur de radicaux libres et intervient grâce à ses propriétés anti oxydantes dans le système immunitaire de l'organisme.

Une carence en vitamine C peut conduire au scorbut se manifestant par des œdèmes et des hémorragies buccales, et peut aller jusqu'à la mort.

- Apports nutritionnels conseillés en vitamines hydrosolubles et comparaison à la spiruline

Les populations choisies sont celles ayant les besoins les plus importants en vitamines hydrosolubles c'est pourquoi ce tableau illustre les apports nutritionnels conseillés chez l'enfant âgé de 1 à 3 ans et chez la femme allaitante.

Tableau 5 : Apports nutritionnels conseillés des vitamines hydrosolubles en comparaison avec les apports de la spiruline (60)

	B1	B2	B3	B5	B6	B8	B9	B12	C
Spiruline (mg/10g de biomasse)	0,08- 1,54	0,02- 0,09	0,06- 0,53	-	0,03-0,4	-	0,02-0,06	0,03-0,08	4,2- 19,33
Rapports Spiruline/ANC (%) <i>enfant 1-3 ans</i>	20-385	2,5-11	1-8	-	5-67	-	20-60	3750- 10000	7-32
Rapports Spiruline/ANC (%) <i>femmes allaitantes</i>	4,5-85	1-5	0,4-3,5	-	1,4-18	-	5-15	1000- 4000	3-15

Bien que la spiruline ne couvre pas la totalité des besoins, elle dispose d'une balance vitaminique optimale pour la plupart des complexes en vitamine B, notamment pour une consommation chez le jeune enfant. Seules les vitamines B5 et B8 sont absentes chez la spiruline.

Il faut toutefois souligner la teneur exceptionnelle en vitamine B12 (cobalamine) qui est de loin la vitamine la plus difficile à obtenir dans un régime sans viande car aucun végétal courant n'en contient. L'apport de seulement quelques grammes de spiruline permettrait de couvrir la totalité des besoins en vitamine B12.

Compte tenu des rôles essentiels joués par les vitamines hydrosolubles, un apport quotidien en spiruline serait bénéfique pour apporter une partie des besoins vitaminiques non couverts par une alimentation peu variée, et ainsi éviter la survenue de nombreuses maladies liées aux carences (59).

- Vitamines liposolubles

Les vitamines liposolubles sont solubles dans les graisses et l'organisme peut les mettre en réserve. Elles sont essentiellement apportées par les aliments d'origine animale et les huiles végétales. Ce sont les vitamines A, D, E et K

- *Vitamine A et provitamine A*

Dans l'alimentation de l'homme, la vitamine A existe sous forme de rétinol et de ses esters, exclusivement présents dans les produits animaux, et sous forme de caroténoïdes pro vitaminiques, majoritairement d'origine végétale.

Ces différentes formes présentent aussi des fonctions variées. Le rétinol est la forme de transport et un produit intermédiaire du métabolisme, le rétinal, est un élément indispensable intervenant dans la vision, l'acide rétinoïque exerce une action marquée sur la prolifération et la différenciation des tissus tels que l'épithélium respiratoire, la muqueuse digestive, la peau, les différentes cellules notamment embryonnaires.

Le béta-carotène ou provitamine A, a une action anti oxydante particulièrement efficace, fondamentale au niveau cellulaire, membranaire et surtout nucléaire (57).

Une carence en vitamine A, problème de santé publique majeur dans les pays en voie de développement, se traduit par des atteintes oculaires (héméralopie, xérophtalmie et cécité irréversible), elle s'accompagne d'une baisse sensible des défenses immunitaires notamment chez le jeune enfant. L'avitaminose A est également un facteur de mortalité maternelle dans les régions pauvres (61).

➤ *Vitamine D*

La vitamine D agit après conversion en 1,25-dihydroxyvitamine D, son métabolite actif principal.

Deux actions essentielles sont exercées par ce métabolite : assurer une minéralisation optimale des tissus minéralisés pendant et après la croissance et contribuer au maintien de l'homéostasie du calcium et du phosphore au niveau rénal, osseux et intestinal.

Une carence en vitamine D induit principalement un défaut de minéralisation du squelette (ostéomalacie chez l'adulte et rachitisme chez l'enfant) et des troubles cliniques dus à l'hypocalcémie (convulsions, laryngospasme, crise tétanique...)

➤ *Vitamine E*

La vitamine E ou tocophérol a la propriété de piéger et d'empêcher la propagation des radicaux libres peroxylés, formés à partir des acides gras polyinsaturés par l'action de l'oxygène. C'est donc un protecteur des lipides membranaires et des lipoprotéines (55).

Une carence vraie en vitamine E est exceptionnelle chez l'homme adulte. Son incidence est plus importante chez l'enfant et surtout le prématuré, en raison de réserves corporelles très faibles. Dans ce cas, une anémie hémolytique peut être observée.

- Apports nutritionnels conseillés en vitamines liposolubles et comparaison à la spiruline

Les populations choisies sont celles ayant les besoins les plus importants en vitamines liposolubles c'est pourquoi ce tableau illustre les apports nutritionnels conseillés chez l'enfant âgé de 1 à 3 ans et chez la femme allaitante.

Tableau 6 : Comparaison des ANC en vitamines liposolubles avec les apports de la spiruline (62)

	Pro A (A)	D	E	K
Spiruline (mg/10g de matière sèche)	6,4- 20 (1-3)	0,03	1,0- 1,9	-
Rapports Spiruline/ANC (%) enfant 1-3 ans	500- 1700	300	25-50	-
Rapports Spiruline/ANC (%) femmes allaitantes	225- 700	300	8-16	-

Le bêta-carotène ou provitamine A est présent dans des quantités largement suffisantes pour couvrir plus de 3 fois les besoins quotidiens sans être toxique pour l'homme. Ce caroténoïde est convertible par l'homme en vitamine A dont les besoins sont estimés à moins de 1g par jour.

Malgré une conversion provitamine A en vitamine A faible ce taux est suffisant pour couvrir les besoins quotidiens. La biodisponibilité des caroténoïdes de la spiruline a été démontrée chez l'homme.

De plus, une étude portant sur 5000 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. Après 5 mois, la proportion d'enfants gravement déficients en vitamine A est passée de 80% à 10%.

Cette étude semble bien démontrer que de très faibles doses de spiruline suffisent déjà à réduire considérablement les risques de cécité et d'atteintes neurologiques consécutives à la déficience en vitamine A chez l'enfant.

La vitamine E est présente en quantité comparable à celle des germes de blé et couvre près de 50 % des besoins de l'enfant pour une dose quotidienne de 10 g de spiruline.

Il faut tout de même souligner que les carences en vitamines peuvent provenir soit d'un défaut d'apport alimentaire en cette vitamine (cas de régimes végétaliens stricts) soit d'un défaut d'absorption. Dans ce dernier cas, un supplément de vitamines par la spiruline ne pourra être donné par voie orale, seules des injections permettront d'améliorer durablement l'état du patient (62).

e. Rôle des minéraux et oligoéléments dans l'organisme

- Minéraux et oligoéléments indispensables

Les éléments minéraux indispensables sont en général classés en deux catégories :

- les éléments minéraux majeurs ou macroéléments comprenant le sodium (Na), le potassium (K), le chlore (Cl), ces trois éléments étant souvent qualifiés d'électrolytes, ainsi que le calcium (Ca), le phosphore (P) et le magnésium (Mg).

- les oligoéléments, comprenant le fer (Fe), le zinc (Zn), le cuivre (Cu), le manganèse (Mn), l'iode (I), le sélénium (Se), le chrome (Cr), le molybdène (Mo), le fluor (F), le cobalt (Co), le silicium (Si), le vanadium (V), le nickel (Ni), le bore (B), l'arsenic (As).

Les minéraux entrent dans la composition de tous les tissus du corps.

Ils se trouvent en quantités considérables dans certaines structures telles que les os, les dents, les ongles et, pour une moindre part, dans les muscles et le sang.

Quant aux oligoéléments, malgré leur faible dosage, ils sont indispensables au bon fonctionnement de l'organisme. Parmi les minéraux contenus chez la spiruline les plus intéressants à étudier sont le fer, le zinc, le magnésium, le calcium, le phosphore et le potassium.

- Fonctions des principaux minéraux et signes de carence

➤ *Fer*

L'organisme adulte renferme 4 g de fer. Il joue un rôle essentiel dans de nombreuses fonctions biologiques.

Il intervient dans la constitution de l'hémoglobine (pigment respiratoire des globules rouges qui assure les échanges gazeux avec le milieu extérieur), de la myoglobine (pigment respiratoire du muscle) et d'enzymes jouant un rôle capital dans de nombreuses fonctions métaboliques.

Les pertes basales journalières de fer varient, chez l'adulte, de 0,9 à 1 mg.

Pour les femmes, de la puberté à la ménopause, la médiane des pertes menstruelles se situe entre 25 et 30 ml par mois, ce qui correspond à des pertes en fer de 12,5 à 15 mg par mois, soit 0,4 à 0,5 mg/j, qui viennent s'ajouter aux pertes basales habituelles.

L'absorption du fer non héminique (non incorporé dans la structure de l'hème) est très variable, souvent très inférieure à 10 % et dépend de la nature du repas.

Certains facteurs favorisent ou compromettent la biodisponibilité du fer non héminique. Selon l'action de ces facteurs, l'absorption du fer d'un repas peut varier de 1 à 20%.

Une carence en fer peut entraîner, à un stade avancé, une anémie ferriprive (diagnostiquée par une réduction du taux d'hémoglobine) (63).

➤ *Zinc*

Le zinc intervient dans l'activité de plus de 200 enzymes, notamment celles qui participent à la protection contre les radicaux libres et celles qui sont impliquées dans la synthèse protéiques.

Ce qui explique son importance dans les phénomènes de renouvellement des cellules, de cicatrisation et d'immunité (63).

➤ *Calcium*

Outre son action sur la minéralisation osseuse, ce cation joue un rôle de second messenger indispensable à tous les échanges cellulaires et dans le couplage électromécanique des membranes cellulaires.

La quasi-totalité (99 %) du calcium corporel (1,0 à 1,2 kg) se trouve dans le squelette et la calcémie est maintenue constante aux dépens du calcium échangeable de l'os. Les besoins calciques de l'organisme se réduisent donc aux besoins de l'os.

Chez l'homme adulte, le besoin minimum d'entretien est estimé à 260 mg de Ca par jour, reparti entre les pertes urinaire (130 mg), fécale (110 mg) et sudorale (20 mg).

La quantité de calcium retenue dans le squelette est variable et peut atteindre 400 mg par jour au moment du "pic" pubertaire. Il est admis que la minéralisation osseuse maximale génétiquement possible est acquise avant 18 ans, même si une certaine consolidation peut se poursuivre jusqu'à 30 ans. Ce pic de masse osseuse, dont l'acquisition est favorisée par une forte consommation de calcium (en majorité apporté par le lait et les produits laitiers) pendant l'enfance et l'adolescence, détermine le risque ultérieur d'ostéoporose.

Le fœtus retient environ 20 g de calcium pendant le dernier trimestre de la grossesse, soit en moyenne 220 mg par jour. Pour une teneur de 320 mg de Ca par litre de lait et un volume journalier de 800 ml, le besoin moyen de lactation est de 250 mg de Ca par jour (Tableau 7).

Le calcium est donc très important à trois stades de la vie : fœtus, enfant et adolescent.

➤ *Phosphore*

Le phosphore est presque exclusivement présent sous forme de phosphates de calcium, de sodium, de potassium dans l'organisme.

Il participe à la formation d'hydroxyapatite au niveau des os.

Sous la forme d'esters phosphoriques (dont l'ATP), il intervient dans la mise en réserve et le transport de l'énergie.

Le phosphore est aussi un élément important de toutes les cellules (nucléotides, acides nucléiques) et membranes biologiques (phospholipides).

Le corps humain adulte contient environ 700g de phosphore dont 85 % environ associés au calcium dans le squelette et les dents (64).

➤ *Magnésium*

Le magnésium est le second cation intracellulaire présent à 60 % dans les os et le cofacteur de plus de 300 systèmes enzymatiques.

Il est nécessaire à la fois à la formation de substrats (MgATP) et à l'activation d'enzymes. Il joue un rôle dans un grand nombre de fonctions cellulaires, notamment celles impliquant la phosphorylation oxydative, la glycolyse, la transcription de l'ADN et la synthèse protéique (64).

➤ *Potassium*

C'est l'ion intracellulaire le plus important de tout l'organisme car il est responsable, avec le phosphore et les protéines, de la pression osmotique dans la cellule.

Par ailleurs, le potentiel de repos d'une cellule est déterminé par la capacité de conduction du potassium. Il constitue un acteur essentiel de la tension artérielle et veineuse, au même titre que le sodium.

Tableau 7 : Comparaison des ANC avec les apports de la spiruline (64)

	Ca (mg)	P (mg)	Mg (mg)	Fe (mg)	Zn (mg)	Cu (mg)	F (mg)	I (µg)	Se (µg)	Cr (µg)
Spiruline (/10g)	43,2	67-90	6,7-27	9-11,7	0,21- 3,7	0,37	-	-	1,98	142
Rapports										
Spiruline/ANC (%) <i>enfants 1-3 ans</i>	9	19-25	8-34	128- 167	3,5-62	46	0	0	10	570
Rapports										
Spiruline/ANC (%) <i>femmes allaitantes</i>	4	9-11	2-7	90-117	1-19	18,5	0	0	3	260

f. Rôles des métaux

Actuellement une douzaine de métaux sont reconnus comme essentiels pour l'organisme humain (Na, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn, Mn, Cr, Ni, Co, Mo, V).

A forte dose certains de ces éléments essentiels sont toxiques (Cr, Ni, Co, Mn, V). Seuls quelques métaux sont considérés comme purement toxiques (Hg, Bi, Be, Ga, Tl, Ra, U...). Chez l'homme, certains métaux présentent une toxicité à long terme importante (Hg, Pb, Cd, Mn, Ni, Cr, Be). En expérimentation animale plusieurs métaux sont reconnus cancérigènes (Be, Cd, Co, Cr, Ni, Pb, Sb) et pour certains d'entre eux leur activité cancérigène chez l'homme est démontrée (Nickel et ses sels, chrome hexavalent).

L'activité immunotoxique surtout immunodépressive de nombreux composés métalliques a été mise en évidence : Be, Cd, Cr, Co, Hg, Pb, Pt ...

Beaucoup de métaux (Cd, Cr, Hg, Ni, Sn, Tl) sont des polluants importants de l'environnement par suite de leur pouvoir d'accumulation dans les organismes vivants (65).

III. Exemple d'utilisation de la spiruline dans la lutte anti-cachexie

1. Exploitation des données d'autres essais de réhabilitation nutritionnelle menés à terme.

Beaucoup d'expériences avec la spiruline, notamment sur la dénutrition, n'ont pas donné lieu à des publications dans des revues spécialisées. Ceci en raison des difficultés pour les ONG de publier dans de telles revues et par manque de moyens humains et financiers pour respecter les protocoles expérimentaux adaptés afin d'éviter par la suite un scepticisme de la part de la communauté scientifique et en particulier des nutritionnistes. Il faut aussi reconnaître que la plupart des essais nutritionnels sur la spiruline, même publiés dans des revues, restent critiquables sous certains aspects (66).

Aujourd'hui, dans beaucoup de pays d'Afrique la malnutrition protéino-énergétique est devenue un véritable problème de santé publique constituant plus de 30 % des hospitalisations avec une mortalité intrahospitalière de 10 à 20 %.

Dans un but d'amélioration de la prise en charge, la richesse protéique et vitaminique de la spiruline a donné lieu à un essai de réhabilitation nutritionnelle dans un CHU de Dakar (67).

Cette étude a été réalisée sur 59 enfants d'âge moyen d'environ 19 mois, atteints de formes graves de malnutrition protéino-énergétique que sont le marasme et le kwashiorkor.

Chacun a reçu une dose journalière de 10 grammes de spiruline en poudre répartie en deux prises journalières mélangée à la bouillie de céréales pendant 30 jours en milieu hospitalier puis 30 jours à domicile.

Les résultats de cet essai ont montré un gain moyen en poids de 7,64 grammes/kg/jour avec une reconstitution partielle de la masse musculaire des enfants.

Le bon état du bilan protidique est confirmé par la nette évolution des marqueurs tels que la préalbumine et l'apolipoprotéine A1.

Ainsi, la préalbumine a augmenté de 175,5 % pour finir à 19 mg/dl à J30 (valeur normale de la préalbumine = 16 mg/dl).

Concernant l'apolipoprotéine A1, bon marqueur de l'état nutritionnel, elle a connu une progression significative en passant de 0,85g/l à l'entrée à 1,17 g/dl à la sortie (normale = 1g/l).

Le taux d'hémoglobine chez ces enfants anémiés a aussi augmenté de façon significative passant de 7,20 g/dl au 1er jour à 8,10 g/dl au 60ème jour, confirmant la richesse en fer biodisponible de la spiruline.

Enfin, la spiruline malgré son goût de poisson fumé, montre une bonne acceptabilité et une bonne tolérance digestive chez les enfants.

Cette expérience a permis de démontrer que ce produit était bien toléré, assurant une prise pondérale satisfaisante et une normalisation des marqueurs biologiques, confirmant ainsi les avantages de cette cyanobactérie pour lutter contre la malnutrition.

On a démontré dans environ une trentaine de centres nutritionnels, hôpitaux et dispensaires, qu'une dose de 10 grammes de matière sèche de spiruline par jour, sur une période de une à trois semaines, permettait aux victimes atteintes de la maladie de kwashiorkor, de carences de malnutrition protéinique de retrouver un état de santé normal.

Ce délai de récupération est de 2 à 3 fois plus rapide qu'avec un traitement conventionnel (66).

Ces différentes études permettent de mettre en exergue que, combinée avec une source d'aliments plus ou moins riches en calories (type riz), la spiruline est probablement un des meilleurs compléments alimentaires pour la récupération des enfants sévèrement malnutris.



Jour 0



Jour 90

Figure 21 : Photos d'un enfant dénutri ayant été traité avec 10g/j de spiruline pendant 3 mois à J0 et J90 au Burkina-Faso (68)

2. Limites des études sur la réhabilitation nutritionnelle

Les essais qui viennent d'être détaillés sont le reflet du grand potentiel nutritionnel de la cyanobactérie.

Grâce à sa composition riche, variée et équilibrée en nutriments et à son efficacité démontrée, la spiruline est un réel atout pour lutter contre la malnutrition des pays en voie de développement.

Il faut tout de même souligner que beaucoup d'essais de réhabilitation nutritionnelle avec la spiruline sont lancés dans des pays en voie de développement.

Cependant, la majorité de ces pays où sévit la malnutrition sont souvent des régions politiquement instables et il est difficile d'arriver aux termes d'une étude.

A ceci s'ajoute d'une part, le respect des normes éthiques qui limite fortement le type d'étude réalisable et d'autre part, un suivi des patients qui est souvent aléatoire avec généralement un grand nombre de perdus de vue.

De tels essais sont tout de même nécessaires pour que la communauté scientifique puisse convaincre les pouvoirs publics internationaux d'investir dans des projets de développement de la spiruline de grande ampleur (69).

3. Observation de l'utilisation de la spiruline dans les villages de l'Association « les Enfants du Soleil »

Durant les trois mois passés à Madagascar, nous avons mis en place des pharmacies internes dans les villages de l'Association basés à : Antananarivo, Antsirabe, Tamatave et Fianarantsoa.

Au sein de ces villages, nous avons observé l'utilisation de la spiruline dans l'alimentation des enfants. Chaque enfant reçoit une dose journalière de 5 à 10 grammes environ de spiruline en poudre répartie en deux prises journalières mélangée à l'alimentation essentiellement à base de riz.

L'Association n'a pas d'étude disponible sur les vertus de la spiruline pour lutter contre la cachexie dont souffrent les nouveaux arrivants. En effet, certains villages ne possédaient ni pèse-personne, ni toise, ni mètre de couturière (pour éventuellement mesurer le tour brachial des enfants). Dans ces conditions, il paraît difficile d'évaluer l'efficacité de la spiruline ajoutée dans l'alimentation des enfants.

Néanmoins, les enfants que nous avons côtoyés sont tous sortis de l'état cachexique dans lequel il se trouvait quelques mois auparavant. Il ne souffrait apparemment d'aucune carence. Un tel résultat n'aurait jamais été possible avec pour seul apport une ration de riz minime deux fois par jour.

CONCLUSION

Depuis la nuit des temps, il existe sur Terre une source nutritionnelle et thérapeutique naturelle sans égale. Richesse protéique, acides aminés essentiels, acides gras essentiels, complexes vitaminiques multiples et fer biodisponible, tout ceci condensé dans une simple algue bleue microscopique nommée *Arthrospira platensis*.

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

Dans les pays développés, même si la spiruline n'a suscité l'intérêt des scientifiques que tardivement, elle jouit aujourd'hui d'un intérêt grandissant grâce à ses multiples propriétés thérapeutiques (70).

Ces effets bien qu'étant plus préventifs que curatifs, en font un complément alimentaire de choix pour prévenir la survenue de maladies tels que les maladies cardiovasculaires, les cancers ou les infections virales, mais aussi pour diminuer les effets secondaires de traitements médicamenteux lourds tels que le sont les traitements antinéoplasiques ou antirétroviraux. Pour une fois, le terme d'aliment fonctionnel pourrait être employé à juste titre, tant le nombre et la qualité des études scientifiques portant sur la spiruline attestent de sa réelle valeur nutritionnelle et de certains effets thérapeutiques.

Les produits à base de spiruline sont en augmentation constante sur le marché pharmaceutique à l'heure actuelle où fleurit le concept de la nutrition-santé, il est certain que le marché des microalgues alimentaires, avec comme chef de file *Arthrospira platensis*, est à l'aube d'une croissance mondiale importante (71).

Dans les années à venir, nos assiettes risquent fortement d'être remplies de micro-

algues alimentaires sous une forme ou sous une autre.

Arthrospira platensis apparait comme l'aliment santé de demain.

Au vu de tous ces éléments, l'algue bleue semble donner tout son sens à la célèbre phrase d'Hippocrate : « Que ta nourriture soit ton médicament ».

BIBLIOGRAPHIE

1. Castenholz RW, Rippka R, Herdman M & Wilmotte A. Form-genus I. *Arthrospira* Stizenberger 1852. *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology*, D. R Boone & RW Castenholz, eds. Springer, NewYork, USA , 2001, vol 1, p.542-543.
2. Chorus, I, Bartram, J. Toxic cyanobacteria in Water: A guide to their public health consequences, monitoring and management. Disponible sur:
http://www.who.int/water_sanitation_health/resourcesquality/toxycyanobacteria.pdf
(consulté le 18/12/12).
3. Nelissen B, Wilmotte A, Neefs JM & De Wachter R. Phylogenetic relationships among filamentous helical cyanobacteria investigated on the basis of 16S ribosomal RNA gene sequence analysis. *Systematic and Applied Microbiology*, 1994, vol 17, p.206-210.
4. Scheldeman P, Baurain D, Bouhy R, Scott M, Muhling M, Whitton BA, Belay A & Wilmotte A. *Arthrospira* (« *Spirulina* ») strains from four continents are resolved into only two clusters, based on amplified ribosomal DNA restriction analysis of the internally transcribed spacer. *FEMS Microbiology Letters*, 1999, 172 : 213-222.
5. Larousse. Définition de cyanobactérie. Disponible sur :
<http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/cyanobact%C3%A9rie/21240#qU8xt0Tkhs06QQcQ.99> (consulté le 05/01/13).
6. Kônig, Claire. Les algues, végétaux aquatiques. 2005. Disponible sur:
<http://www.futura-sciences.com/magazines/nature/infos/dossiers/d/botanique-alguesvegetaux-aquatiques-523/> (consulté le 09/01/13).
7. Garcia-Pichel F. Cyanobacteria. *Encyclopedia of Microbiology*, 2000, Vol. 1. A. Press. p.907-929.
8. Delecroix, J-M (2006). *Les Algues Alimentaires*. Editions Médicis – Albin Michel, pp. 128.

9. Genene, T. Spirulina history ; Spirulina : The Magic Food. Disponible sur : http://www.spirulina-benefits-health.com/spirulina_algae_history.html (consulté le 15/02/13).
10. Paniagua-michel, J., Dujardin, E., Sironval, C. (1993). Le Tecuitlal, concentré de spirulines. Source de protéines comestibles chez les Aztèques. *Cahiers de l'Agriculture*, 2 (4) : 283-287.
11. Village spiruline. Disponible sur : <http://www.spirulina-vera.com/redecouverte.html> (consulté le 24/02/13).
12. Maison de la Spiruline. <http://www.maisondelaspiruline.com/content/10-histoire-de-la-spiruline> (consulté le 02/04/13).
13. Farrar, W-V (1966), Techuitlatl, A Glimpse of Aztec Food Technology. *Nature*, 211 : 341-342.
14. Delpuech, F., Joseph, A., Cavelier, C. (1975), Consommation alimentaire et apport nutritionnel des algues bleues (*Oscillatoris platensis*) chez quelques populations du Kanem (Tchad). *Annales de la Nutrition et de l'Alimentation*, 29 : 497-515.
15. Leonard, J., Compere P. (1967). *Spirulina platensis* (Gom.) Geitler, algue bleue de grande valeur alimentaire par sa richesse en proteines. *Bull. Nat. Plantentuin Belg.* 37 (1), Suppl. : 23 37.
16. Fox, R-D. (1999). Spiruline, Technique pratique et promesse. Editions Edisud. Pp. 246.
17. Chermat, S. La Botanique médicale, Les Cyanobactéries (*Les vertus thérapeutiques de la Spiruline*) Disponible sur : <http://cte.univ-setif.dz/coursenligne/chermatsab/spiruline.html> (consulté le 12/01/15).
18. Sisso, B. (2003). La Spiruline, Saveurs et vertus. Editions Grancher. Pp. 116.

19. Boisvert, C (1988). Les jardins de la mer, Du bon usage des Algues. Editions Terre Vivante. Pp. 149.
20. Praktikum Planktonologi Fpik unpad 2015. Disponible sur : <https://planktonologiunpad.wordpress.com> (consulté le 22/02/15)
21. Prat, R., Vonarx, V. La structure de chloroplaste : La théorie endosymbiotique. Disponible sur : <http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/Chloroplaste/endosymbiose.htm>. (consulté le 23/02/15)
22. Girardin, Andr., Ani, C. (2005). Spiruline : système sanguin, système immunitaire et cancer. *Phytothérapie*, 4 : 158-161.
23. Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail. Risques sanitaires liés à la présence de cyanobactéries dans l'eau. Disponible sur : www.afsset.fr/upload/bibliotheque/085391856141331010617707867709/cyanobacteries.pdf. (consulté le 30/02/15)
24. Charpy L., M.J. Langlade M.-J., Vicente N., RIVA A (2005). Colloque international sur les cyanobactéries pour la santé, la science et le développement. 3-6 mai 2004 à Ile des Embiez, France. *Mém. Instit. ut océanogr.* Paul Ricard, 192 pp.
25. Falquet, J., Hurni, J-P (2008). Spiruline : aspects nutritionnels. Disponible sur : www.antenna.ch/documents. (consulté le 09/03/15)
26. Svcerk, C., Smith, D-W (2004). Cyanobacteria toxins and the current state of knowledge on water treatment option: a review. *Journal of Environmental Engineering and science*. 3 (3): 155-184.
27. Antenna technologies France. Disponible sur : <http://www.antenna.ch/documents/AspNutr2006.pdf> (consulté le 16/03/15)

28. Australian government, Department of Health and Ageing Therapeutic. Compositional guideline, *Arthrospira platensis*. Disponible sur : www.tga.gov.au/docs/html/compguid/platensis.htm. (consulté le 09/03/15)
29. Babadzhanov, A-S., Abdusamatova, N., Yusupova F-M., Faizullaeva, N., Mezhlumyan, L-G., Malikova, M-Kh. (2004). Chemical composition of *Spirulina platensis* cultivated in Uzbekistan. *Chemistry of Natural Compounds*. 40 (3) :276-279.
30. Association française pour l'algologie appliquée (AFAA) (1982) "Actes du premier symposium sur la spiruline *Spirulina Platensis* (Gom.) Geitler de IAFAA.
31. Ross, E., Dominy, W. (1990). The nutritional value of dehydrated, blue-green algae (*Spirulina platensis*) for poultry. *Poultry Science*. 69 (5): 794-800.
32. Xue, C., Hu, Y., Saito, H., Zhang, Z., Li, Z., Cai, Y., Ou, C., Lin, H., Imbs, A. (2002). Molecular species composition of glycolipids from *Spirulina platensis*. *Food Chemistry*. 77 (1): 9-13.
33. Harriman, G-R., Smith, P-D., Horne, M-K., Fox, C.H., Koenig, S., Lack, E-E., Lane, H-C. (1989). Vitamin B12 malabsorption in patients with acquired immunodeficiency syndrome. *Archives of Internal Medicine*. September 1: 2039-2041.
34. Hayashi, T., Hayashi, K. (1996). Calcium Spirulan, an Inhibitor of Enveloped Virus Replication, from a Blue-Green Alga *Spirulina platensis*. *Journal of Natural Products*. 59 (1): 83-87.
35. Avino, P., Carconi, P.L., Lepore, L., Moauro, A (2000). Nutritional and environmental properties of algal products used in healthy diet by INAA and ICP-AES. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 244 (1): 247-252.
36. Puyfoulhoux, G., Rouanet, J-M., Besançon, P., Baroux, B., Baccou J-C., Caporiccio, B (2001). Iron availability from iron-fortified *Spirulina* by an in vitro digestion/ Caco-2 cell culture model. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 49 (3): 1625-1629.

37. Campanella, L., Crescentini, G., Avino, P (1999). Chemical composition and nutritional evaluation of some natural and commercial food products based on *Spirulina*. *Analisis*. 27 (6) : 533-540.
38. Martin, A (2009). Apports nutritionnels conseillés pour la population française. Paris Lavoisier. 3^{ème} édition. Pp. 605.
39. Sall, M-G., Dankoko, B., Badiane, M., Ehua, E., Kuakuwin, N (1999). Résultats d'un essai de réhabilitation nutritionnelle avec la Spiruline à Dakar. *Médecine d'Afrique Noire* 46 (3) : 143-146.
40. Romay, C., Armesto, J., Ramirez, D., Gonzalez, R., Ledon, N. and Garcia, I. (1998). Antioxydant and anti-inflammatory properties of C-phycoerythrin from blue-green algae. *Inflammation Research*. 47 (1) : 36-41.
41. Les Enfants Du Soleil. Notre action à Madagascar. Disponible sur : <http://les-enfants-du-soleil-madagascar.org/notre-action/a-madagascar/> (consulté le 09/03/15)
42. Canal Monde. Cartes géographiques et plans des pays du monde. Disponible sur : <http://www.canalmonde.fr> (consulté le 09/03/15)
43. SOS villages d'enfants Madagascar. Disponible sur : <http://www.vesosmad.org/villages-antsirabe.html> (consulté le 09/03/15)
44. Antenna research for progress. Disponible sur : <http://www.antenna.ch/recherche/nutrition> (consulté le 09/03/15)
45. Antenna Technologies France. La culture de spiruline en images. Disponible sur : <http://www.antennafrance.org/95931.html> (consultée le 15/03/15).
46. Colla, L.M., Bertolin, T.E., Costa, J-A (2004). Fatty acids profile of *Spirulina platensis* grown under different temperatures and nitrogen concentrations . *Zeitschrift für Naturforschung* 59c : 55-59.
47. Jourdan, J-P (1999). Manuel de culture artisanale de la spiruline: cultivez votre spiruline. *Antenna Techn*. Pp. 149.

48. Vidal, J-L (2009). Spiruline, L'Algue aux mille vertus. Edition Jouvence, 10 p
49. Li, Z-Y., Guo, S-Y., Li, L., Cai, M-Y (2007). Effects of electromagnetic field on the batch cultivation and nutritional composition of *Spirulina platensis* in an air-lift photobioreactor. *Bioresource Technology*. p.700-705.
50. Degbey, H., Hamadou, B., Oumarou, H (2006). Evaluation de l'efficacité de la supplémentation en spiruline du régime habituel des enfants atteints de la malnutrition sévère. *International Symposium on Cyanobacteria for Health, Science and Development*. 98 (3) : 104-108.
51. Unicef. Un quart des enfants du monde en développement souffre d'une insuffisance pondérale grave. Disponible sur : www.unicef.org/french/media/media_33724.html (consulté le 15/03/15)
52. Unicef. Faire reculer la malnutrition, c'est faire avancer les droits de l'enfant. Disponible sur : www.unicef.fr/accueil/sur-le-terrain/themes/sante-et-alimentation/malnutrition. (consultée le 17/03/15)
53. Unicef. La situation des enfants dans le monde (1998) Disponible sur : <http://www.unicef.org/french/sowc98/> (consulté le 23/03/15)
54. Unicef. Les différentes formes de malnutrition. Disponible sur : [https://www.unicef.fr/userfiles/Les_diff%C3%A9rentes_formes_de_malnutrition_Unicef_France_juillet_2011\(1\).pdf](https://www.unicef.fr/userfiles/Les_diff%C3%A9rentes_formes_de_malnutrition_Unicef_France_juillet_2011(1).pdf) (consulté le 23/03/15)
55. CUNNY, A. La fonctionnalité d'un aliment est-elle la somme des fonctionnalités des ingrédients qui le composent ? [Thèse de Docteur en Pharmacie]. Nancy : Faculté de Pharmacie de Nancy. 2005.
56. Département de l'agriculture. La nutrition dans les pays en voie de développement. Les macronutriments : glucides, lipides et protéines. Chapitre 9. Disponible sur : <http://www.fao.org/docrep/004/w0073f/w0073f10.htm> (consulté le 23/03/15)

57. Sautier, C., Tremolieres, J (1976). Food value of *spirulina* in humans. *Annales de la Nutrition et de l'Alimentation*. p517-534.
58. Mejean, L. Fonctionnalité des aliments. Disponible sur : www.iaa-lorraine.fr/media/article/document/ (consulté le 23/03/15)
59. Jacotot, B., Campillo, B (2003). Nutrition humaine, Abrégés, Connaissances et pratiques. Editions Masson. Paris. Pp
60. Simpole, J., Zongo, F., Kabore, F., Dansou, D., Bere, A., Nikiema, J-B., Pignatelli S., M, Biondi D., Ruberto G., Musumeci, S (2005). Nutrition Rehabilitation of HIV-Infected and HIV-Negative Undernourished Children Utilizing *Spirulina* *Annals of Nutrition and Metabolism*. 49(6) : 373-380.
61. Bendeck, M (2000). Les pratiques prometteuses et les leçons apprises dans la lutte contre la carence en vitamine A dans les pays de l'Afrique Subsaharienne.
62. Belay, A (2002). The potentiel application of *Spirulina (Arthrospira)* as a nutritional and therapeutic supplement in health management. *The Journal of the American Nutraceutical*. 5 (2) : 26-49.
63. Documentation Biorigin pour "Azina" et "Ferrina. spiruline enrichie en zinc ou en fer. Disponible sur : <http://www.biospirulina.ch/> p55-59 (consultée le 02/04/15).
64. Disponible sur : http://www.acstrasbourg.fr/fileadmin/pedagogie/biotechnologies/Enseignement_technologique/Ressources_pedagogiques/Nutrition/Nutrition_EDE_2nde_PROF_ST2S_BGB_formation_janv_2012.pdf (consulté le 02/04/15)
65. Université Médicale Virtuelle Francophone. Disponible sur : http://campus.cerimes.fr/nutrition/enseignement/nutrition_11/site/html/cours.pdf (consulté le 02/04/15)
66. Institution Intergouvernementale pour l'utilisation de la micro-algue Spiruline contre la malnutrition. Disponible sur : http://www.cisri.net/isp_02_fra.htm. (consultée le 02/04/15)

67. Ehua, E-G. La spiruline au secours des enfants malnutris: Résultats d'un essai de réhabilitation nutritionnelle à Dakar à propos de 59 cas. [Thèse de doctorat en médecine], Dakar, 1996.
68. Sali, MG., Dankoko, B., Badiane, M., Ehua (1999). La spiruline: une source alimentaire à promouvoir. *Médecine d'Afrique Noire*. 46(3) : 140-142.
69. KABORE, F. Réhabilitation nutritionnelle des enfants malnutris VIH positifs et négatifs par la spiruline et le misola à Ouagadougou. Mémoire de Diplôme d'Etudes Approfondies. Université de Ouagadougou 2001. 45 pages.
70. Moorhead, K., Capelli, B (2007). Spirulina, Nature's Superfood. Cyanotech Corporation
71. Dupire, J (2011). La Spiruline, un SuperAliment. Guy Daniel éditeur. Pp. 151.