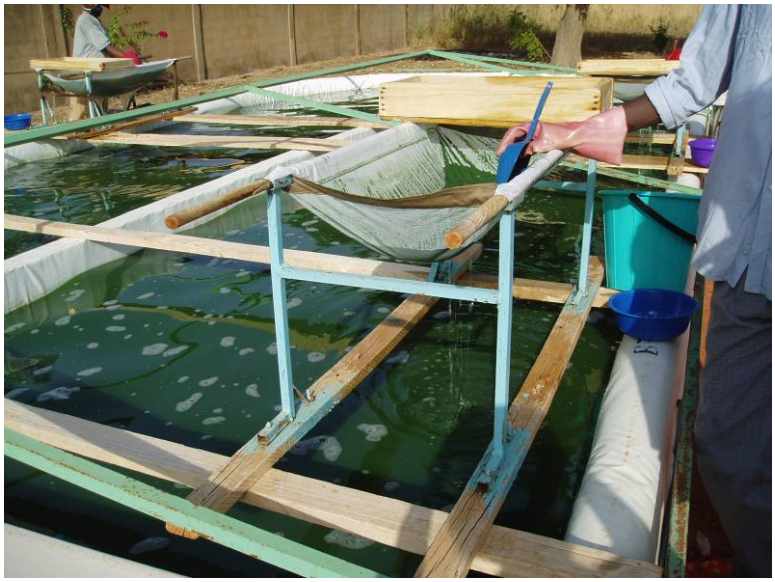
« La Spiruline peut-elle être un atout pour la santé et le développement en Afrique ? »

Août 2008

Loïc Charpy, Marie José Langlade et Romain Alliod



Institut de Recherche pour le Développement
UR 167 (CYROCO)
COM, rue de la Batterie des Lions
13007 Marseille

Loic.charpy@univmed.fr
Marie-jose.langlade@univmed.fr
rom311@hotmail.com

Remerciements

Nos remerciements vont à Alain Pindard qui au nom du MAP a initié cette expertise. Ils vont également aux membres représentants des ONGs Antenna Technologies France, Technap et Codegaz. Nous remercions particulièrement Vincent Guigon et Pierre Ancel, qui nous ont donné accès aux fermes africaines du Burkina Faso et du Niger et qui ont facilité nos rencontres avec les autorités politiques, personnels médicaux, chercheurs et associations villageoises intéressés par la Spiruline. Nous remercions également toutes les personnes qui nous ont reçus en Afrique ; les exploitants de ferme qui ont bien voulu remplir les fiches d'information ; les membres du comité de pilotage qui ont participé aux réunions.

1 INTRODUCTION 5
1.1 POUR L'ETAT DES CONNAISSANCES 5
1.2 POUR LE BILAN DES EXPERIENCES AFRICAINES 6
1.3 POUR LES POSITIONNEMENT DES PARTENAIRES AU DEVELOPPEMENT 6
2 LA SPIRULINE D'UN POINT DE VUE SCIENTIFIQUE 6
2.1 ELEMENTS DE BIOLOGIE DE LA SPIRULINE 6
2.1.1 Taxonomie 6
2.1.2 Répartition géographique 6
2.1.3 Morphologie et caractères généraux 6
2.1.4 Cycle biologique 7
2.1.5 Conditions physiques et chimiques de croissance 7
2.2 COMPOSITION CHIMIQUE DE LA SPIRULINE 8
2.2.1 Composition en protéines et acides aminés 8
2.2.2 Composition en lipides 9
2.2.3 Composition en glucides 11
2.2.4 Composition en acides nucléiques 12
2.2.5 Teneur en vitamines, minéraux et pigments 13
2.3 TOXINES DES CYANOBACTERIES 17
3 LA PRODUCTION DE SPIRULINE 18
3.1 PRODUCTION ARTISANALE 18
3.1.1 Méthode de production artisanale 18
3.1.2 Les principaux problèmes de production 20
3.2 ANALYSE DU FONCTIONNEMENT DES FERMES AFRICAINES 20
3.2.1 Positionnement et rôle dans l'activité locale et régionale 20
3.2.2 Installations et processus de production 21
3.2.3 Distribution 22
3.2.4 Deux projets pilote 22
3.2.5 Les fermes de Spiruline en Afrique peuvent-elles être pérennes ? 23
3.2.6 Que représente l'activité des fermes de Spiruline en Afrique 24
3.3 AMELIORATIONS DE LA PRODUCTION 24
3.3.1 Améliorations de la production 24
3.4 PRODUCTION SEMI-INDUSTRIELLE ET INDUSTRIELLE 24
4 POTENTIALITES ET UTILISATIONS DE LA SPIRULINE 26
4.1 QUALITE, TOXICITE, ET LEGISLATION 26
4.1.1 Qualité 26
4.1.2 Toxicité 26
4.1.3 Législation 27
4.2 POTENTIALITES ET UTILISATION 27
4.2.1 Spiruline à usage humain 27
4.2.2 Spiruline à usage animal 29
4.2.3 Spiruline sous forme d'extraits 29
4.3 LE MARCHE DE LA SPIRULINE 29
5 LA MALNUTRITION DANS LES PAYS EN VOIE DE DEVELOPPEMENT 31
5.1 DEFINITIONS 31
5.2 STRATEGIES POUR LUTTER CONTRE LA MALNUTRITION 32
5.2.1 La prévention 32
5.2.2 Les traitements en structures médicales 33
5.3 PLACE DE LA SPIRULINE POUR LUTTER CONTRE LA MALNUTRITION 34
5.3.1 Utilisation actuelle de la Spiruline en Afrique 34
5.3.2 Analyses des études d'efficacité 35
5.3.3 Position de la Spiruline en tant que complément alimentaire 39
5.3.4 Positions des organismes internationaux sur la Spiruline 41
6 CONCLUSIONS 42
7 BIBLIOGRAPHIE 43

1 INTRODUCTION

Le travail présenté dans ce document répond à une demande d'expertise faite par le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche (MAP) intitulée « La Spiruline, une réponse à la malnutrition en Afrique ? État des connaissances scientifiques, bilan des expériences et enjeux de coopération internationale ». Les termes de référence de cette étude comprennent : 1) un état des connaissances scientifiques sur la Spiruline (biologie, composition et aspects nutritionnels, modes de cultures, productions artisanales et industrielles, marchés dans les pays développés et en voie de développement) accompagné d'une analyse de l'intérêt et des limites de la Spiruline pour lutter contre la malnutrition 2) un état des lieux et un bilan critique sur les expériences de productions africaines 3) un état du positionnement des partenaires au développement sur l'intérêt de la problématique Spiruline – malnutrition pour l'aide publique au développement et dans le cadre des enjeux d'une politique de coopération internationale. Ces termes de référence nous ont amenés à des développements beaucoup plus larges que le seul questionnement « La Spiruline, une réponse à la malnutrition en Afrique ? », aussi avons-nous modifié l'intitulé du document en conséquence.

La Spiruline est une cyanobactérie utilisée traditionnellement depuis plusieurs centaines d'années par certaines populations et connue depuis les années soixante pour ses propriétés alimentaires en protéines (Delpeuch et al. 1976). Par la suite ses teneurs en micro nutriments, en béta-carotène (précurseur de la vitamine A), en fer, en vitamine B12, en acides gras ont intéressé les chercheurs, les industriels et les ONGs.

Nous sommes biologistes de l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD), spécialistes des cyanobactéries et sensibilisés à l'intérêt potentiel de ces organismes, dont fait partie la Spiruline, pour le développement.

Afin de réaliser ce travail, nous nous sommes appuyés :

1.1 Pour l'état des connaissances

Sur les documents suivants :

- ✓ Une sélection d'articles accessibles parmi plus de 2000 répertoriés dans les bases de données électroniques scientifiques telles Current Contents, Bibliovie et Medline. La plupart des études portent sur la biotechnologie et ont été réalisées en Asie (Inde, Chine, Japon), sur le continent américain (Brésil, Mexique, USA), en Europe (Italie et Espagne). Pour les seules années 2006-2008, plus de 200 articles sont répertoriés dans la base Current Contents, dont une cinquantaine portent sur la nutrition et la santé.
- ✓ Des ouvrages dont celui de synthèse édité récemment par Gershwin & Belay : Spirulina in Human Nutrition and Health (2007)
- ✓ Des thèses dont celle de C Zarrouk en 1966 (Contribution à l'étude d'une cyanophycée: influence de divers facteurs physiques et chimiques sur la croissance et la photosynthèse de *Spirulina maxima* (Setch et Gardner) Geitler, de P Bucaille en 1990 (Intérêt et efficacité de l'algue Spiruline dans l'alimentation des enfants présentant une malnutrition protéino-énergétique en milieu tropical) et celle de C Pierlovisi en 2007 (L'Homme et la Spiruline: Un avenir commun? Composition chimique, intérêts alimentaires et activités biologiques).

Nous avons en outre travaillé sur différents documents publiés par les ONGs dont deux ouvrages édités par Antenna Technologies mis à jour sous forme de documents électroniques 1) le manuel très documenté de Falquet & Hurni, (Spiruline, Aspects nutritionnels 2006), 2) le manuel de JP Jourdan (Cultivez votre Spiruline 2006) et 3) l'ouvrage collectif ONG GRET-IRD-Institut National de Nutrition au Vietnam portant sur un exemple de programme nutritionnel (Alimentation infantile au Vietnam 2006).

Nous avons aussi consulté les documents juridiques portant sur la législation appliquée à la commercialisation de la Spiruline.

Nous avons enfin parcouru les sites Internet des organismes internationaux partenaires du développement et de la santé dont la FAO, l'organisation mondiale de la santé (OMS - WHO), Médecins sans Frontières, UNICEF, action contre la faim (ACF).

1.2 Pour le bilan des expériences africaines

Sur les réponses à un questionnaire envoyé aux responsables de fermes africaines et sur les visites effectuées lors d'un voyage d'étude au Burkina Faso, au Niger et à Madagascar.

1.3 Pour les positionnement des partenaires au développement

Sur des entrevues, échanges de courriels et entretiens téléphoniques.

2 LA SPIRULINE D'UN POINT DE VUE SCIENTIFIQUE

2.1 Eléments de biologie de la Spiruline

2.1.1 Taxonomie

La Spiruline est une cyanobactérie (anciennement désignée par le terme « algue bleue » puis cyanophycée). Elle appartient donc au domaine des bactéries (*Bacteria*) et se classe parmi les bactéries gram négatives. Les cyanobactéries forment l'essentiel des bactéries capables de photosynthèse avec production d'oxygène et peuvent être unicellulaires ou pluricellulaires.

La Spiruline appartient à l'ordre des Nostocales (= Oscillatoriales), la famille des Oscillatoriaceae, le genre Oscillatoria et le sous genre Spirulina ou Arthrospira.

2.1.2 Répartition géographique

La Spiruline se développe préférentiellement dans des eaux chaudes, alcalines et riches en nutriments azotés et phosphorés. Plus communément, elle s'observe dans les eaux saumâtres, ainsi que dans les lacs salins de régions tropicales et semi-tropicales (Castenholz et al. 2001). Son caractère thermophile et ses besoins importants en lumière limitent son aire de répartition à une bande intertropicale située environ entre 35° de latitude Nord et 35° de latitude Sud.

Sa forte plasticité écologique permet de la retrouver à l'état naturel à la fois dans les lacs alcalins en Afrique (Tchad, Ethiopie, Tunisie), en Amérique latine (Mexique, Pérou), en Asie du Sud (Inde, Sri Lanka, Thaïlande). Cet organisme est dit ubiquiste. Il est cependant beaucoup moins abondant en Amérique du Nord et en Europe.

2.1.3 Morphologie et caractères généraux

La Spiruline est une cyanophycée microscopique d'une longueur moyenne d'environ 250µm. Elle est composée de filaments mobiles de 10 à 12 µm de diamètre non ramifiés et enroulés en spirale, généralement en 6 ou 7 spires. Cette forme hélicoïdale lui donnant l'allure d'un minuscule ressort lui a valu son appellation de « Spiruline » (Geitler 1932). Cependant les Spirulines présentent différentes formes (Figure 1). On trouve des formes spiralées classiques, ondulées et parfois droites. Cette particularité est en relation directe avec les conditions écologiques rencontrées dans leur habitat.

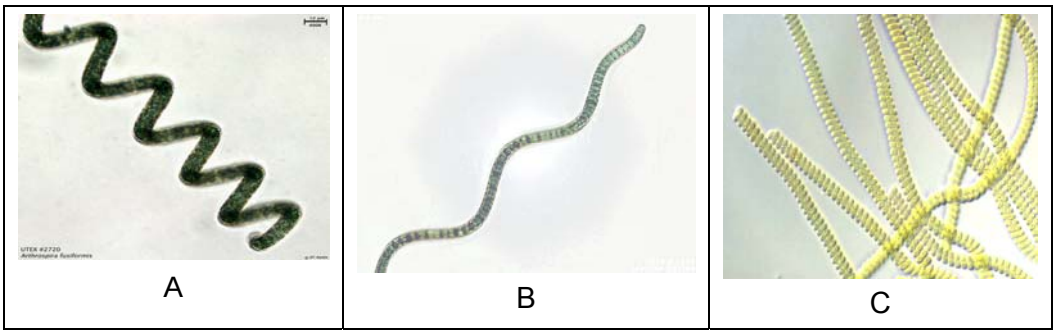


Figure 1 : Différentes formes prises par la Spiruline. A = Forme spiralée (*Arthrospira fusiformis*) Image provenant du site www.utex.org, B= Forme ondulée (*Spirulina maxima*) Image provenant du site www.utex.org, C = *Arthrospira platensis* (http://www.nies.go.jp/biology/mcc/images/PCD4211/0049L.jpg)

Plus précisément, la Spiruline est constituée de cellules transparentes empilées bout à bout formant ainsi un filament ou trichome. L'enroulement du trichome sur lui-même s'effectue suivant le sens des aiguilles d'une montre lorsqu'on regarde au dessus de la spirale. Les facteurs environnementaux tels la température auraient cependant une influence sur l'orientation de l'hélice, (Muhling et al. 2003). Cette morphologie typique lui permet de se déplacer dans l'eau en adoptant le mouvement d'une vis.

Le système pigmentaire de la Spiruline est constitué de chlorophylle *a* ; de pigments hydrosolubles, les phycobilines rouge (phycoérythrine) et bleu (phycocyanine) ; de caroténoïdes (ß-carotène, cryptoxanthine).

2.1.4 Cycle biologique

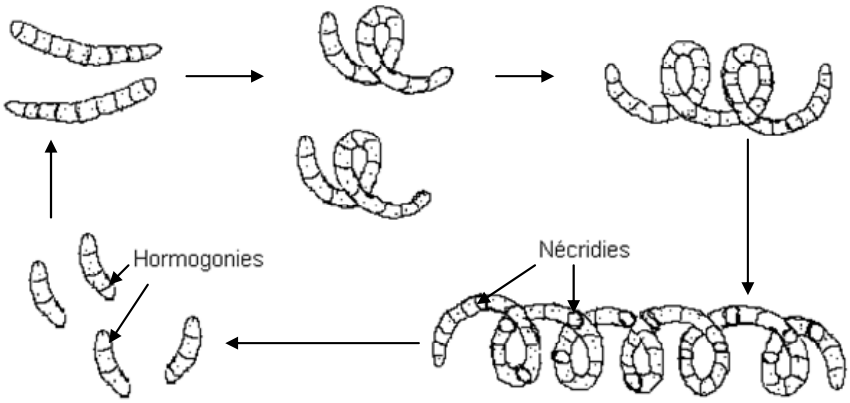


Figure 2 : Cycle biologique de la Spiruline (Balloni et al. 1980)

Le cycle est schématisé dans la Figure 2. Le filament de Spiruline à maturité forme des cellules spéciales appelées nécridies. Elles se différencient des autres cellules par leur aspect biconcave et sont assimilées à des disques de séparation. A partir de ces derniers, le trichome se fragmente pour donner de nouveaux filaments de 2 à 4 cellules appelés hormogonies. Les hormogonies vont croître en longueur par division binaire (chacune des cellules va donner deux cellules par scissiparité) et prendre la forme typique hélicoïdale. En conditions expérimentales, le temps de génération (passage d'une génération à une autre) maximal de la Spiruline est de l'ordre de 7 heures (Zarrouk 1966).

2.1.5 Conditions physiques et chimiques de croissance

Pour se développer, la Spiruline a besoin d'éléments minéraux simples tels l'eau, les sels minéraux, le CO_2 et l'O_2 qu'elle puise directement dans son milieu tout en utilisant la lumière solaire comme source d'énergie grâce à son système pigmentaire. Ce mode de synthèse de biomasse est la photo autotrophie.

La Spiruline croît dans des milieux naturels caractérisés par des eaux saumâtres, chaudes, alcalines (8< pH <11,5) et natronées (fortement concentrées en carbonates et bicarbonates)

de la zone intertropicale. En règle générale les phosphates, les carbonates, les nitrates et le fer, sont les éléments limitants de la production phytoplanctonique dans les milieux aquatiques. Dans les gisements naturels, ces éléments sont apportés par les bassins versants. La Spiruline se développe dans des eaux chaudes (28 à 40°C) et bénéficiant d'une intensité lumineuse élevée. Le vent joue un rôle important en créant une agitation qui favorise une dispersion homogène de la Spiruline dans le milieu, et donc son exposition à la lumière.

En milieu naturel, lorsque les conditions sont optimales, les Spirulines peuvent se développer en grande quantité et entrent alors en compétition avec d'autres organismes. Lors des efflorescences, la consommation des carbonates et bicarbonates entraîne une augmentation du pH limitant ainsi la croissance des autres microorganismes.

2.2 Composition chimique de la Spiruline

La composition de la Spiruline dépend des éléments chimiques dont elle dispose dans le milieu. Ainsi, en milieu naturel, dans la région du Kanem (Tchad), la Spiruline récoltée n'est pas de qualité égale d'un « ouadi » à l'autre. En milieu cultivé, il est possible de jouer sur les intrants et d'influer sur sa composition. La culture en bassin permet en tous les cas de maîtriser la qualité.

La plupart des études des constituants de la Spiruline ont été réalisées sur *Spirulina platensis* (connue aussi sous l'appellation de *Arthrospira platensis* ou *S. geitler*). Cette espèce sert de référence car sa composition est relativement constante même si elle varie selon la souche, les conditions de culture et le mode de conditionnement.

Nous avons associé les potentiels thérapeutiques et nutritionnels aux composants de la Spiruline en nous basant sur des articles scientifiques, qui pour la plupart concernent des études sur les animaux et sur des tissus humains *in vitro*. Nous gardons à l'esprit que l'expérimentation d'une molécule au laboratoire ou sur des animaux ne permet pas de prévoir complètement ses effets chez l'homme.

Beaucoup d'articles concernant les effets thérapeutiques sont basés sur l'ingestion de Spiruline ou le traitement par des extraits du milieu de culture. Il est dans ce cas difficile de savoir quelles sont la ou les molécules qui agissent ou interagissent.

2.2.1 Composition en protéines et acides aminés

La teneur en protéines de la Spiruline est élevée. Elle représente 10 à 11% de la masse humide, soit 60 à 70% de sa matière sèche (Clément 1975b, Fox 1999). Ce pourcentage est bien plus élevé que celui du poisson (25%), du soja (35%), de la poudre de lait (35%) et des céréales (14%) (Henrikson 1994). La Spiruline est très riche en matières azotées et en contient deux fois plus que le soja, trois fois plus que la viande ou le poisson. Cette richesse est cependant à relativiser compte tenu de la faible quantité de Spiruline utilisée en complément alimentaire (<10g par jour).

Ce micro-organisme ne possède pas de paroi cellulosique mais une enveloppe relativement fragile, constituée de polysaccharides. Cette faible teneur en cellulose explique sa digestibilité de l'ordre de 75 à 83% (Costa et al. 2002). De ce fait, la Spiruline ne nécessite pas de cuisson ni même l'administration d'un traitement spécial pour une bonne digestibilité protéique.

Tableau 1 : Pourcentage moyen des acides aminés de *Spirulina platensis* selon différents auteurs et de *Spirulina mexican* d'après (Borowitzka, Borowitzka 1988).

Acides Aminés	Jacquet 1974	Clément 1975b	Fox 1999	Borowitzka
Acides aminés essentiels* (%)				
Isoleucine	5,60	6,40	5,98	5,70
Leucine	8,00	9,00	8,71	8,70
Lysine	4,20	4,80	5,28	5,10
Méthionine	2,25	2,60	2,85	2,60
Phénylalanine	4,40	4,60	5,09	5,00
Thréonine	4,70	5,50	5,58	5,40
Tryptophane	1,00	1,60	1,48	1,50
Valine	5,70	6,90	7,72	7,50
Acides aminés non essentiels (%)				
Alanine	7,25	7,90	8,24	7,90
Arginine	6,60	6,70	7,92	7,60
Acide aspartique	9,30	9,20	9,50	9,10
Cystéine	0,95	0,90	0,93	0,90
Acide Glutamique	**NC**	12,90	13,20	12,70
Glycine	4,80	5,00	5,07	4,80
Histidine	1,60	1,60	1,50	1,50
Proline	3,60	3,90	4,32	4,10
Sérine	5,00	5,60	5,46	5,30
Tyrosine	4,30	4,90	**NC**	4,60

* acide aminé indispensable qui ne peut être synthétisé *de novo* par l'organisme et doit donc être apporté par l'alimentation

La Spiruline possède la plupart des acides aminés dont les acides aminés essentiels que sont l'isoleucine (Ile), la leucine (Leu), la lysine (Lys), la méthionine (Met), la phénylalanine (Phe), la thréonine (Thr), le tryptophane (Trp) et la valine (Val). Les plus fortes teneurs sont celles de la leucine, la valine, et l'isoleucine. Les acides aminés soufrés (méthionine et cystéine) ainsi que d'autres non-soufrés (tryptophane, lysine et l'histidine), essentiels chez l'enfant, sont peu abondants, ce qui relativise sa richesse protéique (Tableau 1).

2.2.2 Composition en lipides

Les lipides représentent généralement de 6 à 8% du poids sec de la Spiruline mais ce pourcentage peut atteindre 11% (Hudson & Karis 1974). La composition en lipides totaux se caractérise par un bon équilibre entre acides gras saturés et acides gras polyinsaturés (AGPI). Elle se subdivise en deux fractions : une fraction saponifiable « ou acides gras » (83%) et une fraction insaponifiable (17%) (Clément 1975a).

□ Les acides gras

La fraction saponifiable, représentant 4,9 à 5,7% de la matière sèche de la Spiruline (Fox 1999), est essentiellement composée de monogalactosyl diglycéride et de digalactosyl diglycéride (23%), de sulfoquinovosyl diglycéride (5%) et de phosphatidyl glycérol (25,9%) (Xue et al. 2002). Les triglycérides ne sont présents qu'à de très faibles taux (0,3%). La phosphatidyl choline, la phosphatidyl éthanolamine et le phosphatidyl inositol ne sont pas

présents en quantité appréciable. Il est à noter que 4,6% de phospholipides sont encore indéfinis.

Tableau 2 : Composition typique en pourcentage des principaux acides gras de 3 espèces de Spiruline d'après (Pascaud et al. 1993).

Acides gras	*S pacifica*	*S maxima*	*S platensis*
Palmitique (16:0)	44,2	63,0	25,8
Palmitoléique (16:1) oméga-6	4,4	2,0	3,8
Stéarique (18:0)	Traces	1,0	1,7
Oléique (18:1) oméga-6	0,4	4,0	16,6
Linoléique (18:2) oméga-6	24,3	13,0	40,1
Gamma-linolénique (18:3) oméga-6	22,1	13,0	40,1
Alpha-linolénique (18:3) oméga-3	Traces	Traces	Traces

La composition des principaux acides gras de 3 espèces de Spiruline (Tableau 2) révèle la présence d'une forte concentration en acides gras essentiels (acides gras insaturés C18). Ces acides gras incluent les oméga-3 et des oméga-6 qui sont qualifiés d'essentiels car l'organisme humain en a absolument besoin et ne peut les produire.

Les acides gras omega-3 et oméga-6 de la Spiruline préviendraient l'accumulation de cholestérol dans l'organisme. Ceci pourrait expliquer en partie la diminution des taux en cholestérol et triglycérides observés lors des expériences de Ramamoorthy & Premakumari (1996) et Samuels et al. (2002). Ces expériences sur l'homme sont cependant réalisées avec de faibles effectifs et sur des sujets souffrant d'hyper cholestérolémie ou hyperlipidémie.

L'acide gamma-linolénique (non-essentiel car il peut être synthétisé à partir de l'acide gras linoléique) constitue 10 à 20% des acides gras (soit 1-2% du poids sec) chez *Spirulina maxima* et jusqu'à 40% chez *S. platensis*, (soit 4% du poids sec). La Spiruline figurerait parmi les meilleures sources connues d'acide gamma-linolénique, avec le lait humain, et quelques huiles végétales peu connues (huile d'onagre, de bourrache, de pépin de cassis et de chanvre) (Ciferri 1983 ; Cohen et al. 1993). La présence d'acide gamma-linolénique est à souligner du fait de sa rareté dans les aliments courants et que c'est un précurseur de médiateurs chimiques des réactions inflammatoires et immunitaires (Falquet & Hurni 2006).

Les sulfolipides tels les sulfoquinovosyl diglycérides qui représentent 5% de la fraction saponifiable, intéressent les chercheurs pour leur activité protectrice contre des infections virales. Le composant lipide sulfoquinovosyldiacylglycerol (SQDG) de *Spirulina platensis* riche en sulfolipides a démontré par expérience *in vitro* sa capacité à inhiber la transcriptase inverse[1] du hiv-1 et du hiv-2 alors que ce dernier est naturellement résistant à cette classe de molécules (Kiet & Durand Chastel 2006).

Le contenu en acide gras de la Spiruline peut être modifié suivant les conditions de culture (Colla et al. 2004).

□ La fraction insaponifiable

La fraction insaponifiable est composée essentiellement de stérols, de terpènes, d'hydrocarbures saturés (paraffines) et de pigments. Cette fraction représente 1,1% à 1,3% de la matière sèche de la Spiruline (Fox 1999).

Bien que certaines études révèlent l'absence de stérols, il semblerait que ces derniers représentent néanmoins 1,5% de la fraction lipidique non polaire de la Spiruline (Falquet & Hurni 2006). D'après Clément (1975), Hudson & Karis (1974) les taux de stérols libres ne

[1] Enzyme utilisée par les rétrovirus qui transcrivent l'information génétique des virus de l'ARN en ADN et qui peut s'intégrer dans le génome de l'hôte.

dépassent pas 0,015% du poids sec de la cyanophycée. Ces stéroïdes sont principalement le colionastérol, l'avenasterol et en plus faible quantité, le cholestérol. Certains des stérols présents pourraient partiellement expliquer l'activité antimicrobienne de la Spiruline (Clément 1975a)

Les terpènes représentent de 5 à 10% de la fraction insaponifiable (Clément 1975b). Chez *Spirulina platensis*, ils sont essentiellement représentés par l'alpha et le beta-amyrine, triterpène pentacyclique (Clément 1975a).

Les hydrocarbures saturés à longues chaînes (paraffine) constituent 25% des lipides insaponifiables chez *Spirulina platensis* et *Spirulina maxima* (Bujard et al. 1970), soit 0,1 à 0,3% de la matière sèche (Tulliez et al. 1975). Les deux tiers sont constitués de n-heptadécane et le tiers restant d'hydrocarbures linéaires saturés en C15, C16, et C18, ainsi que trois hydrocarbures saturés à chaînes ramifiées non identifiés (Tulliez et al. 1975). Les paraffines sont fréquemment retrouvées dans diverses sources alimentaires. Ce type de molécules et en particulier le n-heptadécane peut être toxique. Nous discuterons de cette toxicité possible dans le paragraphe 4.1.2.

2.2.3 Composition en glucides

Les glucides représentent 13,6 à 25% de la matière sèche des Spirulines (Falquet & Hurni 2006, Quillet 1975, Shekharam et al. 1987). La paroi des Spirulines comme les bactéries Gram-négatives, est formée de glucosamine et d'acide muramique associés à des peptides.

□ Glucides simples et polyols à petites molécules

Les sucres simples comme le glucose, le fructose et le saccharose existent à l'état de traces. Le glycogène représente 0,5%, le glycérol et des polyalcools comme le mannitol et le sorbitol sont présents en petite quantité.

□ Glucosanes aminés et Rhamnosannes aminés

L'essentiel des glucides assimilables est constitué par ces polymères. Ils constituent l'ensemble des mucilages extractibles par l'eau, soit 11 à 12% du poids sec. Le glucosane et le rhamnosanne constituent respectivement 1,9% et 9,7% du poids sec de la Spiruline (Quillet 1975). La glucosamine représente une part non négligeable des polysaccharides. Par contre, le galactose et ses dérivés sont absents de cet équipement glucidique.

□ Cyclitols

Présents sous forme phosphorylée, les cyclitols correspondent à 2-3 % de la matière sèche de la Spiruline. Ils se composent essentiellement de meso-inositol phosphate qui constitue une source de phosphore organique ainsi que d'inositol (350-850mg de matière sèche) (Challem et al. 1981). Cette teneur en inositol serait selon (Falquet & Hurni 2006) environ huit fois celle de la viande et plusieurs centaines de fois celle des végétaux les plus riches en cette molécule. Les cyclitols phosphatés sont aussi des capteurs de calcium qui peuvent avoir un effet décalcifiant si l'apport en calcium devenait insuffisant (Quillet 1975).

□ Glucides des parois cellulaires

Ces glucides se retrouvent sous la forme d'acide sialique à de très faible teneur (0,5%), de glucannes aminés et de rhamnosanne aminés, ainsi que d'acide muramique et glucosamine sous forme de chlorydrate, tous deux associés à des peptides et à un pourcentage totalisant 2% (Clément et al. 1967, Quillet 1975).

La paroi de la Spiruline présente une teneur en glycogène estimée à environ 0,5% de son poids sec (Fox 1999, Quillet 1975) et une teneur en cellulose très faible, soit 0,5% de son poids frais (Jacquet 1974). Elle serait donc facilement assimilable même par les personnes ayant une absorption intestinale faible.

□ Polysaccharides sulfatés

La Spiruline est constituée aussi de polysaccharides sulfatés spécifiques comme le spirulane-calcique (Ca-Sp) ou le spirulane-sodique (Na-Sp) (Lee et al. 1998). Ces

polysaccharides sont porteurs de nombreux résidus sulfatés et se composent de rhamnose, ribose, mannose, fructose, galactose, xylose, glucose, d'acide glucuronique et galacturonique, ainsi que d'ions calcium et sodium. Ils auraient d'après des études *in vitro* des propriétés anticoagulantes[2], immunostimulantes et antivirales (Lee et al. 2001).

Activité anticoagulante : Le *Spirulane Calcique (Sp-Ca)* agirait en activant le cofacteur II de l'héparine, molécule qui inhibe la thrombine, donc la coagulation (Hayakawa et al. 1996, 2000, 2003). Le *Spirulane Sodique* (*Sp-Na*), autre polysaccharide sulfaté spécifique à la Spiruline, aurait aussi des effets anticoagulants (Yamamoto et al. 2003).

Renforcement du système immunitaire : Plusieurs expériences positives sur les animaux attestent que la Spiruline régulerait favorablement le système immunitaire (Qureshi et al 1996 ; Pascaud et al 1993 ; Borchers et al 2007). Elle augmenterait l'activation des macrophages, l'activité des cellules T et l'activité des cellules naturellement destructrices (NK). Ce processus permettrait la libération des gamma-interféron (IFN - γ), ce qui peut éventuellement rendre les virus inactifs. Ces actions se feraient par le biais des polysaccharides.

Activité antivirale : L'activité antivirale de la Spiruline a été étudiée sur l'inhibition de la pénétration du virus *Herpes simplex* dans les cellules HeLa et chez des hamsters par Hayashi et al. (1993). Plus tard, Hayashi et al. (1996) mettent en évidence le rôle de *Sp-Ca* qui interviendrait selon deux mécanismes 1) inhibition de la pénétration des virus 2) inhibition de la phase de réplication des virus.

Activité radio protectrice : Zhang et al. (2001) considèrent que la Spiruline pourrait améliorer la restauration de l'hématopoïése[3] chez l'homme et être ainsi utilisée comme traitement dans les thérapies anticancéreuses pour en diminuer les effets secondaires.

- Immulina

Un nouveau polysaccharide d'un poids moléculaire élevé a été isolé chez *Spirulina platensis*. Cet activateur potentiel des monocytes et macrophages humains a été nommé « Immulina ». Ce polysaccharide, structurellement complexe et fortement hydrosoluble, représente entre 0,5% et 2% du poids sec de cette cyanophycée. Pugh et al. (2001) ont isolé « Immulina » de *Spirulina platensis* et observent *in vitro* une activation des monocytes 100 à 1000 fois plus élevée que celle produite par des préparations de polysaccharides utilisés habituellement en clinique pour traiter les cancéreux.

Un article plus récent (Lobner et al. 2008) portant sur l'ingestion d' « Immulina » par 11 patients en bonne santé rapporte un effet immédiat mais temporaire sur les défenses immunitaires.

2.2.4 Composition en acides nucléiques

La Spiruline renferme 4,2 à 6% d'acides nucléiques totaux (30% ADN et 70% ARN) dans sa matière sèche (Santillan 1974). La richesse en acides nucléiques d'un aliment peut induire à terme une production importante d'acide urique par dégradation biochimique des purines. L'ARN en produit deux fois plus que l'ADN. L'excès de cet acide peut entraîner à la longue des calculs rénaux et des crises de gouttes. Il est admis que la dose maximale d'acides nucléiques tolérables à long terme est de 4g/j pour un adulte. Il faudrait consommer 80 g de Spiruline sèche pour atteindre cette dose (la quantité de Spiruline usuellement consommée ne dépasse pas 10 g de matière sèche).

[2] Un anticoagulant est une molécule destinée à empêcher ou à retarder la coagulation du sang. Il prévient les thromboses (caillots sanguins dans la circulation générale) et les embolies (caillot sanguin dans la circulation artérielle pulmonaire). Les antigoagulants les plus connus sont l'héparine et ses dérivés ;les antivitamines K

[3] Fonctions de production du sang, de transport de l'oxygène et des métabolites, et de la coagulation.

2.2.5 Teneur en vitamines, minéraux et pigments

Dans ce chapitre, nous comparons les besoins journaliers d'un enfant de 6 mois à 3 ans avec ce que peut apporter une dose de 10 g de Spiruline (dose maximum donnée à des enfants). Pour évaluer cet apport, il nous faut tenir compte de la quantité de micronutriment contenue dans 10 g de Spiruline, mais aussi de celle qui sera réellement incorporée par l'organisme (biodisponibilité). Selon les aliments la biodisponibilité d'un micronutriment peut être très faible, jusqu'à moins de 10 %. Les besoins journaliers d'un enfant extraits du Tableau 1 de Lutter & Dewey (2003) sont comparés en terme de pourcentage avec les apports de 10g de Spiruline. Nous gardons à l'esprit que la Spiruline est utilisée comme complément alimentaire et que le reste des micronutriments doit être fourni par la nourriture de base dont le lait maternel chez les jeunes enfants.

□ Vitamines

La Spiruline contient une large gamme de vitamines (Tableau 3). Les valeurs du tableau sont variables car elles concernent différentes productions avec des procédés de conservation variés. En effet, les vitamines sont sensibles à la chaleur. D'après une étude (Bujard et al. 1970), les teneurs en vitamines du Tableau 3 seraient diminuées d'environ un tiers dans le cas de séchage sur des tambours chauffants. La granulométrie du produit final intervient également dans la préservation immédiate et la conservation à long terme des vitamines notamment pour le β-carotène (Seshadri et al. 1991). Une granulométrie plus élevée permettrait une meilleure conservation. Cet auteur déconseille le séchage par pulvérisation.

Tableau 3 : Teneur en vitamines en µg/g de matière sèche de Spiruline d'après (Falquet & Hurni 2006) complété par d'autres références pour la Vitamine E

Vitamine	Teneur	Vitamine	Teneur
Vitamines hydrosolubles		**Vitamines liposolubles**	
B1 (thiamine)	34-50	Provitamine A (β-carotène)	700-1700
B2 (riboflavine)	30-46	Cryptoxanthine	100
B3 (niacine)	130	Vitamine E (alpha-tocophérol)	120** 50-190*** 13****
B5 (pantothénate)	4,6-25		
B6 (pyridoxine)	5-8		
B8 (biotine)	0,05		
B9 (folate)	0,5		
B12 (cobalamine)	0.10-0.34*		
C (acide ascorbique)	Traces		

* hors pseudo vitamine B12

** Vincenzini et al. (1979)

*** Falquet & Hurni (2006)

**** Gomez-Coronado et al. (2004)

- *Vitamine B12 et C*

Parmi les vitamines hydrosolubles, on note la présence de vitamines du groupe B. Les teneurs sont moins importantes que dans la levure, excepté pour la vitamine B12. Bien que cette teneur soit exceptionnelle pour un végétal, la biodisponibilité de ce complexe B12 chez l'homme est remise en cause par Yates (2001). Plus récemment, elle est rediscutée par Falquet & Hurni (2006). Un article de Watanabe (2007) conclut que la plupart des cyanobactéries utilisées en complément alimentaire contiennent une part prédominante de pseudo vitamine B12, inactive chez l'homme. Le besoin journalier en vitamine B12 d'un enfant de 6 mois à 3 ans est de 0,5 à 0,9 µg. Si l'intégralité de la vitamine B12 (hors la

pseudo) était biodisponible, une dose de 10 g de Spiruline couvrirait de 142 % (teneur basse) à 486 % (teneur haute) des besoins de l'enfant.

La vitamine C n'existe qu'à l'état de trace dans la Spiruline.

- *Vitamine A*

Parmi les vitamines liposolubles, on note une teneur très élevée en β-carotène. Cette provitamine A représenterait 80% des caroténoïdes totaux (Pierlovisi 2007), le reste étant principalement composé de xanthophylle, de cryptoxanthine, d'echinénone, de zéaxanthine et de lutéine. La vitamine A n'étant pas synthétisée par l'organisme humain, elle doit être obligatoirement apportée par l'alimentation. Elle est impliquée dans la croissance des os et la synthèse de pigments de l'œil. La Spiruline ne contient pas de vitamine A libre, seulement du β-carotène. Les teneurs en β-carotène du Tableau 3 sont élevées, cependant un surdosage de β-carotène ne peut être toxique. L'organisme humain convertit ce pigment en vitamine A « ou rétinol » en quantité nécessaire à ses besoins (Henrikson 1994). Il n'y a donc pas de risque d'excès de vitamine A (hypervitaminose).

Une étude récente de Wang et al. (2008) portant sur des chinois adultes montre que l'ingestion de 4.5 mg de β-carotène provenant de la Spiruline apporte 1mg de vitamine A. Ainsi, les teneurs données dans le Tableau 3 correspondraient en terme de vitamine A à 156 – 378 µg de vitamine A par g de Spiruline. Il faudrait prendre entre 3 et 6 g de Spiruline pour couvrir les besoins journaliers recommandés chez l'adulte, estimés à 900 µg. En ce qui concerne les enfants de 6 mois à 3 ans, si le coefficient de conversion du β-carotène en vitamine A est le même que pour les adultes, compte tenu de leur besoin journalier en cette vitamine (300 - 500 µg), il leur faudrait une dose de Spiruline entre 1 et 3 g/j.

- *Vitamine E*

La vitamine E a des propriétés antioxydantes[4] envers les acides gras insaturés et se conserve très bien après séchage de la Spiruline. On note dans le Tableau 3 des teneurs en vitamine E de la Spiruline variant de 13 (Gomez-Coronado et al. 2004) à 120 µg/g (Vincenzini et al. 1979). Cette très forte variabilité des teneurs est liée probablement a) à des méthodes de dosage différentes b) à des qualités de Spiruline différentes. Les besoins journaliers d'un enfant de 6 mois à 3 ans sont de 5 10^3 à 6 10^3 µg ; si la biodisponibilité était de 100 %, une dose de 10 g de Spiruline couvrirait de 2 à 22 % de ces besoins.

□ Sels minéraux et oligo-éléments

La composition en minéraux de la Spiruline apparaît dans le Tableau 4. On observe une grande variabilité dans les teneurs. Elle s'explique par le fait qu'elles concernent les Spirulines en milieu naturel et celles cultivées. La variabilité dans les cultures maîtrisées est bien moindre. En outre, il est possible d'augmenter les teneurs en minéraux des organismes cultivés (Falquet & Hurni 2006).

[4] L'oxydation fait partie d'une réaction d'oxydo-réduction qui transfère des électrons d'une substance vers un agent oxydant. Cette réaction d'oxydation est nécessaire à la vie mais peut produire parfois des radicaux libres qui entraînent des réactions en chaîne destructrices pour les cellules. On parle alors de stress oxydatif. Les antioxydants sont capables de stopper ces réactions en chaîne en s'oxydant avec les radicaux libres et annihilant ainsi leur action.

Tableau 4 : Composition en minéraux de la Spiruline cultivée en µg/g de sa matière sèche d'après (Falquet & Hurni 2006)

Minéraux	Teneur	Minéraux	Teneur
Calcium	1300-14000	Cuivre	8-10
Phosphore	6700-9000	Chrome	2,8
Magnésium	2000-2900	Manganèse	25-37
Fer	580-1800	Sodium	4500
Zinc	21-40	Potassium	6400-15400

- *Fer*

Les Spirulines naturelles ont rarement des teneurs en fer dépassant 500 mg/kg bien que des valeurs supérieures à 1000 mg/kg aient été trouvées (Campanella et al. 1999). La Spiruline de culture peut être enrichie en Fer et les teneurs obtenues peuvent être alors plus de 10 fois supérieures à celles présentées dans le Tableau 4. C'est le cas de Végifer Spiruline cultivée dans les Andes.

Le fer est essentiel à l'organisme humain car il intervient dans la constitution de l'hémoglobine, de la myoglobine et d'enzymes jouant un rôle capital dans de nombreuses réactions métaboliques. Johnson & Shubert (1986) ont étudié la biodisponibilité du fer de la Spiruline chez le rat et Puyfoulhoux et al. (2001) sur des cellules Caco-2. Cependant la biodisponibilité (absorption + utilisation) ne peut-être mesurée chez l'Homme que par des études *in vivo* avec des isotopes stables.

Le besoin journalier en Fer d'un enfant de 6 mois à 3 ans est de 7 10^3 à 11 10^3 µg. Si l'intégralité du fer était biodisponible, une dose de 10 g de Spiruline couvrirait de 64 % (teneur basse) à 200 % (teneur haute) des besoins de l'enfant.

Notons que les céréales complètes classées parmi les plus riches en fer contiennent 150 à 250 µg de Fer par g. Une dose de 90 g céréales suffirait à couvrir les besoins en Fer d'un adulte et 38 g ceux d'un enfant.

- *Zinc*

Le Zinc est considéré comme un micronutriment majeur dans la lutte contre la malnutrition (Gibson 2005).

La Spiruline cultivée ne contient généralement que des traces de Zinc (21 - 40 µg/g). Ces teneurs sont insuffisantes pour que la Spiruline soit considérée comme une bonne source en Zinc. En effet, le besoin en Zn d'un enfant de 6 mois à 3 ans est estimé de 3 10^3 à 5 10^3 µg. Si l'intégralité du zinc était biodisponible une dose de 10 g de Spiruline couvrirait de 5 à 10 % de ces besoins.

Cependant la Spiruline peut être enrichie (Cogne et al. 2002). Une Spiruline de Biorigin l'Azina titrerait 6000 µg Zn/g. Antenna Technologie développe un protocole simple pour enrichir la Spiruline en Zinc (Falquet & Hurni 2006).

A notre connaissance, la biodisponibilité du Zinc de la Spiruline n'a pas fait l'objet de publication scientifique.

- *Magnésium*

Le Mg est un élément important pour la santé et une carence est fréquente chez les enfants malnutris (Briend 1998).

La Spiruline est naturellement riche en Mg. Planes et al. (2002) ont montré par des études sur des cellules intestinales Caco-2 qu'un enrichissement en Mg n'améliorait pas la disponibilité en Mg. Le besoin en Mg d'un enfant de 6 mois à 3 ans est estimé de 75 10^3 à 80 10^3 µg. Si l'intégralité du Mg était biodisponible une dose de 10 g de Spiruline couvrirait de 26 à 37 % de ces besoins.

- *Potassium*

La teneur en potassium (6,4 10^3 - 15,4 10^3 µg/g) pourrait être intéressante, notamment dans les pays industrialisés où le rapport potassium/sodium serait trop faible dans la grande majorité des aliments disponibles (Falquet & Hurni 2006). Le besoin en potassium d'un enfant de 6 mois à 3 ans est estimé de 700 10^3 à 3000 10^3 µg. Si l'intégralité du potassium était biodisponible une dose de 10 g de Spiruline couvrirait pour le moins 2 % et pour le mieux 22 % de ces besoins.

- *Sélénium*

Le sélénium est un antioxydant car il agit contre les radicaux libres. Il n'y a pratiquement pas de sélénium dans la Spiruline naturelle mais il est possible d'enrichir la Spiruline en sélénium (Chen T et al. 2006; Li et al. 2003). Cases et al. (1999, 2001, 2002) ont montré la biodisponibilité par les rats du sélénium à partir de Spiruline fortifiée. Notons que le besoin en Se d'un enfant de 6 mois à 3 ans est estimé à 20 µg.

- *L'iode*

La carence en iode provoque des troubles irréversibles du développement. Il est possible d'obtenir des souches de Spiruline capables de fixer l'iode (Mazo 2004 ; Singh 1994) mais les sels d'iodes sont chers et la Spiruline ne semble pas concentrer activement cet élément. Notons que le besoin journalier en iode d'un enfant de 6 mois à 3 ans est de 130 à 90 µg.

□ Pigments

La Spiruline contient des chlorophylles dont la chlorophylle *a* (typique des végétaux), des caroténoïdes dont le principal est le β-carotène et des phycobiliprotéines telles la phycocyanine et la phycoérythrine.(voir paragraphe 2.1.3)

Les teneurs en pigments de *Spirulina platensis* apparaissent dans le Tableau 5. Ces pigments sont responsables de la couleur caractéristique de certaines espèces de flamants qui consomment cette cyanobactérie dans l'African Valley.

Tableau 5 : Teneurs en pigments exprimées en mg pour 10g de matière sèche de *Spirulina platensis* (Pierlovisi 2007).

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

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

D'après l'étude de Fedkovic et al. (1993) les antioxydants comme le β-carotène contenus dans la Spiruline permettraient d'inhiber à la fois l'effet mutagène et l'effet régulateur induit par les radicaux libres, préservant ainsi nos tissus.

Le β-carotène est d'autre part un précurseur de la vitamine A (voir paragraphe sur la vitamine A page 14).

2.3 Toxines des cyanobactéries

Certaines cyanobactéries synthétisent des toxines, ainsi les microcystines synthétisées par *Planktothrix agardhii*, auraient entraîné des déficiences hépatiques et la mort de patients traités dans un centre d'hémodyalise au Brésil en 1996 (Jochimsen et al. 1998). La même cyanobactérie aurait contaminé les organismes aquatiques du lac Varese en Italie en août 1997 (Prati et al. 2002). Cependant des études dont celle réalisée dans l'étang de Bolmon (Chomérat et al. 2006 ; Briand et al. 2002 ; Kohler & Hoeg 2000) ont montré que la toxicité de *Planktothrix agardhii* n'est pas toujours exprimée. En ce qui concerne les Spirulines, elles ne possèderaient pas les gènes qui assurent la synthèse des cyanotoxines (Isabelle Iteman, comm. « Colloque International sur les cyanobactéries pour la Santé, la Science et le Développement » Embiez, 2004).

Un acide aminé potentiellement toxique, le Beta-N-methylamino-L-alanine[5] (BMAA), serait présent dans 97 à 98% des cyanobactéries souches et espèces (Cox et al. 2005). Des observations sur le peuple Chamorro (Micronésie) ont montré que cette molécule pourrait être responsable de la maladie d'Alzheimer (Weiss & Choi 1988). La neurotoxicité de cette molécule fait l'objet de publications récentes : Cruz-Aguado et al. (2006) mettent en cause la neurotoxicité du BMAA chez la souris; Lobner et al. (2007) montrent que le BMAA à faible dose associé à un traumatisme peut jouer un rôle dans les maladies neurodégénératives chez la souris et appellent à de nouvelles recherches.

[5] Le Beta-N-methylamino-L-alanine (BMAA) est une molécule organique, neurotoxique, notamment produite par des cyanobactéries

3 LA PRODUCTION DE SPIRULINE

La production de Spiruline se fait à plusieurs échelles : artisanale, semi-industrielle et industrielle. Les éléments de différenciation de ces modes de production sont la surface totale des bassins de culture et leurs surfaces unitaires, les moyens et matériaux utilisés, les degrés de technologie, les objectifs. Le processus de fabrication de la Spiruline passe cependant par les mêmes étapes obligatoires, lesquelles seront décrites ci-après, sur la base des méthodes artisanales.

Les sources d'information de ce chapitre proviennent de Tsarahevitra (2005), Jourdan (2006), Dupire (1998), Fox (1999), les Actes du Colloque des Embiez (2006), P. Ancel (Rater son projet Spiruline dans les Pays en Voie de Développement (PVD) : http://www.Spirulineburkina.org), Elyah (2003), CREDESA (http://www.spirunet.org/livres/livret-guide-de-production-de-Spiruline) et de communications personnelles.

3.1 Production artisanale

Les fermes artisanales de Spiruline sont des systèmes d'exploitation nécessitant un faible apport en énergie. La surface des bassins est très variable, n'excédant pas la centaine de m^2 pour une surface totale inférieure à 3000 m^2. Les moyens mis en œuvre peuvent être rustiques, faisant appel au bon sens et à l'ingénierie.

Ripley Fox est un précurseur des projets de culture de la Spiruline à l'échelle artisanale pour lutter contre la malnutrition. En 1985, dans le cadre du système de santé villageoise intégré, il a proposé une alternative pour la petite production, utilisant les concepts de bioconversion. Son objectif était l'amélioration de l'état de santé des enfants malnutris dans les PVD. Plus tard, J-P Jourdan, sensibilisé par la thèse de Patricia Bucaille (Bucaille 1990) sur l'utilisation de la Spiruline pour soigner les enfants atteints de malnutrition sévère (1986-1987), a organisé en 1992 au Zaïre la construction de plusieurs petits bassins. Il a lancé par la suite sur les continents sud-américain (Pérou, Chili) et africain (République Centre Afrique).des productions artisanales de Spiruline à vocation humanitaire.

Durant ces quinze dernières années, le nombre de productions artisanales de Spiruline n'a cessé de s'accroître, particulièrement dans les pays en voie de développement. C'est grâce à l'appui financier et technique des ONG que ces productions ont vu le jour. L'objectif des ONG est de créer un maximum de fermes aquacoles dans les contrées touchées par la malnutrition, afin de rendre la Spiruline accessible aux populations.

Sur le continent africain, les fermes existent dans une quinzaine de pays. La culture de Spiruline suscite souvent l'intérêt des autorités.

En France, une quinzaine de fermes ont été créées suite à l'ouverture en 2004, au Centre de Formation Professionnelle et de Promotion Agricoles (CFPPA) de Hyères, d'une formation à la culture de la Spiruline à vocation humanitaire.

Un état des lieux de la production artisanale dans le monde est actualisé chaque mois depuis 2002 sur INTERNET (http://pagesperso-orange.fr/petites-nouvelles/index.htm) par JP Jourdan. Les « Petites nouvelles de la Spiruline » rendent compte des créations et des activités des fermes en Afrique Francophone Centrale et de l'Ouest, en Inde, en Amérique du Sud voire en France. Sur ce site JP Jourdan tient annuellement à jour le manuel « Cultivez votre Spiruline » qui sert de référence à de nombreux fermiers.

3.1.1 Méthode de production artisanale

□ Mise en route d'une culture

Pour lancer une production artisanale de Spiruline il faut de l'eau contenant des nutriments, du soleil et une température entre 25 et 40°C.

Pour la mettre en place et en assurer le suivi, il faut avoir fait le bon choix du site et des matériaux de construction, disposer de quelques instruments de laboratoire (balance, loupe

ou microscope), de quelques outils simples à réaliser, d'intrants (engrais) et d'une souche de Spiruline robuste.

Le choix du site doit tenir compte :

- ✓ du climat : l'exposition au soleil pour un maximum d'intensité lumineuse, la température (au dessous de 20°C, la croissance est stoppée).
- ✓ de l'accès à l'eau (cours d'eau, fleuves, puits, mer)
- ✓ de la possibilité d'acheter les intrants

Le choix d'un site pour l'implantation d'une ferme de Spiruline en Afrique dépend en outre de la volonté et de la compétence d'un partenaire local et de l'acceptation par les populations locales.

Les bassins peuvent être construits en dur, en argile, en bâche plastique (Figure 3).



Armature en bois avec lit de cendre



bâche plastique



parpaings revêtus de plastique



béton

Figure 3 : Exemples de bassins de culture

Actuellement la taille minimum recommandée pour un bassin est de 60m^2. Les bassins sont remplis d'eau à un niveau atteignant 15 à 20 cm.

Le milieu de culture est basé sur celui de Zarrouk (1966), modifié la plupart du temps en fonction des disponibilités des intrants.

L'agitation des bassins se fait de plus en plus avec une roue à aube ou une pompe excepté pour les petits bassins encore agités au balai.

Les sites de production ne sont pas toujours situés à proximité d'un gisement naturel de Spiruline. Les souches circulent d'une exploitation à l'autre et franchissent les frontières. Lorsque le choix est possible, les souches préférées sont la *Platensis*, la Lonar, la Paracas, considérée à l'heure actuelle comme la plus résistante et la plus productive.

□ Récolte et extrusion

Dans de bonnes conditions il est possible de récolter chaque jour 1/6 à 1/3 de la culture. La culture est filtrée à travers deux dispositifs, en général superposés. Le premier est constitué d'une toile fine (maillage environ 300 µm de vide) qui retient les grumeaux, insectes, larves et feuilles. Le second est un tissu à mailles plus fines (environ 30 µm) qui retient la Spiruline.

La biomasse humide est pressée. La Spiruline fraîche ainsi obtenue peut être consommée directement, ou séchée pour conservation.

- Séchage et conditionnement

La biomasse est extrudée en spaghettis afin de pouvoir la sécher plus facilement. Elle est mise à sécher dans des séchoirs solaires, à gaz ou électriques. La norme de la teneur en eau de Spiruline sèche est inférieure à 10%. En général la Spiruline vouée à la commercialisation contient 7 % d'eau. Le séchage dans un four jusqu'a 60° semble ne pas modifier de façon notable les propriétés de la Spiruline.

La Spiruline sèche est alors broyée sous forme de poudre ou sous forme de paillettes et conservée dans un récipient étanche à l'abri de l'humidité et de la lumière. La Spiruline peut être conditionnée dans des sachets, boîtes ou flacons sous formes de brindilles, de poudre, de gélules et de comprimés.

3.1.2 Les principaux problèmes de production

Une mauvaise santé de la Spiruline se reconnaît à l'odeur et à la couleur de la culture. Elle se solutionne par un entretien régulier des bassins ce qui a un coût en temps humain et en installations de protection.

Les Spirulines ne sont pas toujours sous forme hélicoïdale. Elles peuvent présenter des formes droites ressemblant fortement aux *Oscillatoria* réputées pour leur toxicité. La plupart des néophytes ne sont pas en mesure de les différencier. Cette forme droite est redoutée des algoculteurs.

La Spiruline s'altère avec le temps. Son odeur devient caractéristique d'une algue oxydée, et sa couleur verte disparaît. Un séchage et une conservation mal réalisés (température trop élevée, exposition à la lumière) entraînent une perte de qualité en vitamines et chlorophylle.

3.2 Analyse du fonctionnement des fermes africaines

Nous avons dressé un inventaire le plus exhaustif possible des fermes africaines (août 2007), que nous avons représentées sur une carte avec l'outil interactif Google Maps (http://maps.google.fr/maps/ms?ie=UTF8&hl=fr&msa=0&msid=105283320431578582382.0000436c7daecbafd2e0dc&t=h&z=2&om=1). Ces 45 fermes sont réparties dans 18 pays, y compris Madagascar.

Nous avons exploité vingt questionnaires, dix sept pour le continent africain (huit pays) et trois pour Madagascar. Celui en provenance du Tchad, concerne la récolte sur un des sites naturels du lac Tchad (Sorto 2003). Ces questionnaires représentent un peu moins de la moitié des fermes recensées dans le panorama des fermes africaines et font plus particulièrement état des fermes de l'Afrique de l'Ouest.

3.2.1 Positionnement et rôle dans l'activité locale et régionale

Avec huit fermes datant de plus de 5 ans, six des années 2004-2005 dont deux exploitées seulement en 2006 et 2007, six enfin des années 2006-2007, les cultures de Spiruline peuvent être considérées comme récentes en Afrique.

La vocation des fermes est unanimement affichée à but humanitaire, pour l'amélioration de la santé. La culture de la Spiruline s'inscrit pour plusieurs fermes dans la politique de projets intégrés d'associations villageoises ou de communes, ayant pour but le développement local (lutte contre le chômage, mise en valeur des ressources).

Un quart d'entre elles affichent clairement être ou vouloir être des centres de formation à la culture de Spiruline. Un tiers s'inscrit dans un programme nutritionnel ou de sensibilisation à l'utilisation de la Spiruline pour la santé.

La mise en œuvre des exploitations s'appuie sur des structures bien implantées localement : cinq reposent sur une instance religieuse, six sur des associations villageoises, trois sur des municipalités, cinq sur des organismes de santé et recherche, une est supportée par une industrie locale. Les soutiens locaux relèvent des secteurs santé, éducation et

développement. L'OCADES[6] au Burkina Faso, comptabilisé comme instance religieuse, est une organisation catholique pour le développement et la santé : il supporte deux fermes importantes. Le CREDESA[7] au Bénin, organisme sous tutelle des Ministères de l'Enseignement Supérieur et de la Santé, dont une des missions est l'éducation nutritionnelle de la population, a contribué en 1998 au lancement de la ferme Unité de Production de Spiruline (UPS) à Pahou. Ces partenaires, avec lesquels est fondé le projet initial, fournissent aux fermes des appuis logistiques (terrain, ressources en eau, électricité, local, clôtures, matériel informatique). Leur rôle est fondamental et les fermes sont tributaires de la constance de ces partenaires.

L'appui technique est apporté par les ONGs.

Les exploitations bénéficient de l'appui financier d'associations privées et d'ONGs. Quatre d'entre elles ont reçu le soutien financier d'organismes internationaux. L'Etat Burkinabé a financé à 100% un projet de ferme à Koudougou.

Toutes les fermes ont un accès téléphonique et un accès Internet local. Généralement, elles sont situées à proximité des grands axes, donc accessibles en bus à quelques kilomètres près. Seules quelques unes sont très difficiles d'accès.

La plupart des fermes accèdent à l'eau par leurs propres moyens (puits, forage ou pompage). Trois y accèdent par le réseau public. Deux bénéficient de l'eau courante des organismes qui les accueillent. Six fermes accèdent à l'électricité par le réseau national. Les autres ont des sources d'énergie mixtes, solaire/réseau national, solaire/groupe électrogène, réseau national/groupe électrogène.

3.2.2 Installations et processus de production

Les types d'installations et le milieu de culture ressemblent à ceux présentés dans la méthode de production artisanale. La plupart des bassins sont en parpaing fabriqué localement. L'étanchéité est assurée avec des bâches de camion dont la durée de vie est limitée. Les fermes suffisamment solides financièrement évoluent vers des bassins en béton.

Une partie des fermes a totalement abandonné les systèmes d'ombrage déclarés coûteux, fragiles, freins à la culture.

Le système d'agitation généralement adopté est constitué de roues à aube.

Le système de séchage est mixte pour plus de la moitié des exploitations : les fours solaires sont relayés le soir, quand nécessaire, par des fours à gaz, électriques ou au charbon de bois.

La qualité est contrôlée à différents niveaux : surveillance assidue des bassins (contrôle quotidien des principaux paramètres de culture : pH, densité, température, concentration, niveau d'eau) ; examen hebdomadaire au microscope ; analyses microbiologiques périodiques conseillées jusqu'à quatre fois par an lorsque la législation le prévoit. C'est le cas pour les fermes du Burkina Faso et de Madagascar.

Les systèmes de recyclage du milieu de culture sont prévus dans huit fermes et opérationnels dans moins de la moitié d'entre elles. Les systèmes de salinages sont à l'essai. Les risques d'accumulation de plomb sont parfois envisagés mais non contrôlés.

Dans onze fermes de six pays, la Spiruline est conditionnée sèche en paillette ou en poudre dans des sachets aluminés vides d'air. Au Burkina Faso, les sachets achetés en commun sont personnalisés en ajoutant les noms du pays et de la ferme[8]. A Madagascar, dans deux

[6] OCADES : Organisation CAtholique pour le DEveloppement et la Solidarité

[7] CREDESA : Centre REgional pour le DEveloppement et la Santé

[8] Depuis trois ans les producteurs se sont groupés en association des producteurs de Spiruline du Burkina Faso (APSB). Le bureau est constitué de quatre membres. Quatre fois par an, les exploitants se réunissent dans quatre endroits différents : Loumbilla, Nanoro, Ouahigouya, Koudougou. Echanges de savoirs, mutualisation des moyens, processus de production homogénéisé, stratégies de distribution avec un logo de reconnaissance, actions pour un label de qualité sont les objets de ces

fermes sur trois, et dans les autres fermes du Niger, le conditionnement est encore fait en sachets PVC à l'abri de la lumière.

La surface exploitée des bassins va de 25m^2 à 1200m^2 : quatre fermes exploitent plus de 500m^2, six entre 200 et 500m^2, sept moins de 200 m^2. La surface moyenne exploitée est de 342m^2.

Selon les experts des ONGs, une productivité correcte est de 6g de matière sèche m^{-2} jour^{-1}. Sur quinze productivités communiquées, trois fermes affichent une productivité au-dessus de 6g m^{-2} jour^{-1}, sept entre 4 et 6 g m^{-2} jour^{-1}, cinq moins de 4 g m^{-2} jour^{-1}. Les meilleures productivités sont obtenues lorsque la surface des bassins est supérieure à 200 m^2.

Les productions annuelles varient de 40 à 1700 Kg (3000 Kg pour Nayalgué, la plus importante, présentée dans le paragraphe 3.2.4). La production totale sur quinze fermes étudiées est de 9T, soit une production moyenne de 600 Kg.

Sur quatorze fermes, le coût de revient moyen est de 25,5€. Pour quatre fermes du Burkina Faso il est de 20€ avec une faible fourchette de 19€ à 21,4€ ; pour les trois fermes de Madagascar il est aussi de 20€ avec une fourchette supérieure, de 16€ à 25€. Au Mali et au Niger, sur 4 fermes, le coût moyen est de 28€. Enfin les coûts les plus élevés sont de 37€ au Togo et 40€ au Bénin.

3.2.3 Distribution

□ Humanitaire

La part humanitaire annoncée couvre en moyenne 28% de la distribution. Elle est principalement faite dans les centres de réhabilitation nutritionnelle (CRN) pour les enfants. Elle est faite également dans des centres accueillant les malades atteints du VIH.

Les quantités annuelles distribuées par les fermes peuvent atteindre 255 Kg. En 2007, une grande partie de la production dédiée à l'humanitaire n'a pu être distribuée faute de financement.

□ Commerciale

La distribution commerciale se fait dans les pharmacies, les coopératives de bien-être, par Internet, directement aux particuliers. Au Burkina Faso les producteurs ont mis en place un mode de vente ambulante sur la capitale afin d'assurer la promotion de la Spiruline. Une partie de la production de ce pays serait exportée dans les pays limitrophes et même en France. Cependant l'augmentation soudaine de production de Spiruline liée à l'implantation d'une importante ferme n'a pu être écoulée.

3.2.4 Deux projets pilote

A plus grande échelle, deux projets pilotes ont vu le jour: 1) le projet de la ferme « Spiruline Nayalgué » au Burkina Faso en milieu maîtrisé 2) le « projet pilote de développement de la filière dihé »[9] au Tchad en milieu naturel.

□ Le projet Nayalgué

Financé sur 5 ans par le Ministère de la Santé du Burkina Faso, pour un montant de 1 455 000 €, ce projet a pour objectif général de contribuer à l'amélioration de la santé de la population grâce à l'utilisation de la Spiruline. La population cible est 100 000 enfants dénutris, 60 000 personnes vivant avec le VIH/SIDA, 200 000 personnes désireuses d'améliorer leur santé. Un des objectifs spécifiques du projet est la création d'une entreprise

---

rencontres. Les responsables de fermes sont incités à envoyer régulièrement des échantillons pour analyses microbiologiques au Laboratoire National de Santé Publique (LNSP) et à demander une autorisation de mise sur le marché (AMM) de leur produit. Trois fermes ont actuellement reçu l'AMM. Ces fermes sont présentées dans un site internet : http://www.Spirulineburkina.org/.

[9] Le dihé est une galette fabriquée traditionnellement au Tchad à partir de Spiruline récoltée en milieu naturel.

pérenne et autonome, qui servirait d'unité pilote de production de Spiruline et pourrait susciter d'autres initiatives au niveau national et au niveau sous régional. Le projet prévoit des exploitations à échelle semi-industrielle : 3 600m^2 pour « Nayalgué 1 » et 20 000 m^2 pour « Nayalgué 2 ».

Au moment de l'expertise « Nayalgué 1 » exploitait 1 200m^2.

□ Le projet de développement de la filière « dihé » au Tchad

Financé sur 2 ans par l'UE, pour un montant de 1 000 000 €, ce projet dans lequel est impliquée la FAO a pour objectifs 1) de contribuer à la mise en œuvre du Programme National de Sécurité Alimentaire (PNSA) et à l'amélioration de la sécurité alimentaire au Tchad par la valorisation de la filière « dihé » 2) de contribuer à la lutte contre la pauvreté en milieu rural par l'amélioration des conditions de vie des fermes productrices du « dihé » au Tchad. Plus spécifiquement, ce projet vise à améliorer la qualité de la production du « dihé », promouvoir la filière commerciale du produit, renforcer la capacité des femmes productrices de « dihé ». Quinze sites naturels sont retenus dans la région du Lac Tchad et celle du Kanem.

Ce projet a été présenté par Mahamat Sorto (comm. coll. Tuléar 2008[10]).

3.2.5 Les fermes de Spiruline en Afrique peuvent-elles être pérennes ?

Les fermes peuvent être pérennes sans être autonomes. C'est le cas des fermes qui entrent dans le fonctionnement même de la structure d'accueil : la production totale est alors dédiée à cette structure.

Il est impossible à ce jour de juger de la pérennité des exploitations car elles sont trop récentes. Par contre il est envisageable d'évaluer les facteurs favorables et défavorables à ce qu'elles le deviennent.

□ Facteurs favorables

- ✓ Leur utilité : puisque elles sont soutenues par des instances locales qui relèvent de la santé, de l'éducation, du développement, les exploitations de Spiruline en Afrique sont jugées utiles dans ces domaines.
- ✓ L'appropriation par les fermiers du processus de production, de l'ensemencement au conditionnement.
- ✓ La qualité des responsables de fermes qui les gèrent comme des petites entreprises.
- ✓ L'appropriation par les fermiers de la production, en tant que production locale
- ✓ La bonne coopération entre les producteurs dans le but d'améliorer leur production et l'obtention d'une Spiruline labellisée de qualité.
- ✓ L'ouverture vers l'exportation

□ Facteurs défavorables

- ✓ Instabilité
  - Politique : insécurité, désorganisation de l'état
  - Des institutions : un turn-over important au niveau des responsables des services de santé accompagné d'un manque de transmission de l'information
- ✓ Difficulté d'obtenir des intrants
- ✓ Problème d'écoulement de la production
  - Quand défection du soutien local
  - Produit pas utilisé dans un protocole de lutte contre la malnutrition
  - Prix de revient élevé
  - Faible pouvoir d'achat des populations

[10] Colloque international « Spiruline et Développement », 28-30 avril 2008, Tuléar, Madagascar

- Pas de tradition de consommation de Spiruline
- Produit méconnu
- Produit pas toujours agréable au goût
- Isolement des fermes
- Compétition avec les productions chinoise et indienne

✓ Autonomie financière : seules quatre fermes sont autonomes. Rappelons toutefois que les fermes sont récentes et que toutes n'ont pas vocation à l'autonomie.

3.2.6 Que représente l'activité des fermes de Spiruline en Afrique

Les fermes étudiées emploient au total un peu moins d'une centaine de personnes, soit, en extrapolant sur l'ensemble des fermes africaines recensées dans le panorama, environ deux cents personnes.

Le coût investi pour l'ensemble des fermes d'Afrique est estimé à 1 200 000 € si on ne tient pas compte de Nayalgué (945 000 €).

La surface exploitée par l'ensemble des fermes africaines peut être estimée à 1,4 Ha et leur production annuelle à 18 T. La production mondiale qui était de 4000 T en 2000 serait aujourd'hui autour de 8000 T grâce à la production chinoise. La production des fermes africaines représenterait moins de 0,3 % de la production mondiale.

3.3 Améliorations de la production

Ce chapitre est réalisé à partir des notes techniques de JP Jourdan et C Darcas (ONG Technap).

Les améliorations portent sur le prix de revient, la productivité, la qualité et la protection de l'environnement. Elles sont intégrées dans l'enseignement dispensé aux stagiaires du CFPPA de Hyères.

3.3.1 Améliorations de la production

Une simulation informatique sur la culture de Spiruline dans des conditions qui seraient idéales a montré que selon la latitude, la productivité pouvait varier de 5,7 à 10,7 g de matière sèche m^{-2} $jour^{-1}$ et le coût de revient d'un Kg de Spiruline sèche de 10,8 € à 6,5 €. Pour améliorer la productivité, le prix de revient, la qualité de la production et pour préserver l'environnement, les recommandations des auteurs portent sur :

- ✓ le remplacement des intrants importés par des produits locaux pour diminuer les prix,
- ✓ l'utilisation de nouveaux matériaux pour les bassins et de serres pour diminuer la consommation d'eau,
- ✓ l'amélioration de l'agitation et des conditions de travail,
- ✓ l'amélioration du séchage et du conditionnement,
- ✓ l'utilisation de système de recyclage du milieu de culture.

En outre, pour améliorer le contenu en micronutriments de la Spiruline produite, des enrichissements en Fe, Zn ou Se sont envisagés.

La ferme de Nayalgué au Burkina Faso respecte une partie des recommandations précédentes. Cela se traduit par une amélioration de la production tant en termes d'efficacité technique que des conditions de travail. Cette ferme a des retombées positives sur la qualité de la production des autres fermes du Burkina Faso.

3.4 Production semi-industrielle et industrielle

Les systèmes de production semi-industrielle et industrielle se différencient par l'ordre de grandeur de l'investissement, la surface des bassins de culture, le tonnage de production, et la sophistication des techniques de production.

Les fermes semi-industrielles sont des systèmes de production qui peuvent être modulaires et démarrer à partir de petites exploitations de type artisanal. Ces fermes sont constituées de

bassins de 200 à 1000 m^2 avec une surface totale exploitée entre 3000 m^2 et 1 hectare. Leur capacité de production annuelle est de10 à 50 tonnes (Ayala et al. 2006).

La demande de Spiruline au niveau mondial est en augmentation et certaines exploitations sont passées à une échelle industrielle. Les productions industrielles sont représentées, depuis plus de 20 ans, par de grosses compagnies telles que Earthrise, Cyanotech ou Siam Algae. Cette production se distingue des précédentes par l'importance des moyens mis en place dont ceux pour les contrôles de qualité, sa capacité de production et son objectif, purement commercial. Une exploitation industrielle, d'une surface totale de plusieurs hectares, peut produire entre 50 et 500 tonnes de Spiruline sèche par an. Les bassins ont une surface de 1000 à 5000 m^2. La plupart des productions industrielles utilisent des systèmes informatisés contrôlant automatiquement la production.

4 POTENTIALITES ET UTILISATIONS DE LA SPIRULINE

La composition chimique de la Spiruline a vivement intéressé les ONG : plusieurs la voient comme un moyen de lutte contre la malnutrition. Cette utilisation de la Spiruline, objet principal du présent rapport, sera traitée dans le chapitre 5.

De nombreuses recherches sont effectuées principalement en Asie et sur le continent américain, sur les propriétés des molécules présentes dans la Spiruline. Ces recherches sont prometteuses, même s'il n'y a peu de preuve d'efficacité chez l'homme. L'ouvrage de synthèse récent édité par Gershwin & Belay (2007) fait un bilan de l'état de ces travaux.

Les produits naturels utilisés comme compléments alimentaires intéressent de plus en plus les populations. La Spiruline, qui ne s'avère pas toxique, répond à la législation sur les compléments alimentaires. La commercialisation de la Spiruline pour la santé semble indépendante de l'obtention de preuves d'efficacité, non réclamées pour les compléments alimentaires. C'est cet aspect de la Spiruline que nous allons développer dans ce chapitre. Nous complèterons par d'autres utilisations commerciales.

Avant tout une mise au point nous paraît nécessaire sur la qualité de la Spiruline, sa toxicité potentielle et la législation dont elle dépend.

4.1 Qualité, toxicité, et législation

4.1.1 Qualité

Rappelons que la qualité de la Spiruline est variable.

□ Les protéines

La teneur en protéines peut décroître de 10 à 15% selon le moment de la récolte, celle en méthionine (AA soufré) de 30% selon le mode de séchage. Les conditions pour une teneur optimum sont une récolte au début de la photopériode et un séchage par pulvérisation au détriment des tambours chauffants (Falquet & Hurni 2006).

□ Les vitamines

La chaleur et la granulométrie interviennent dans la conservation des teneurs en vitamines (Bujard et al 1970 ; Sedrashi et al. 1991). Ce dernier auteur déconseille le séchage par pulvérisation pour une meilleure conservation de la provitamine A.

La biodisponibilité de la vitamine B12 semble hautement dépendante de la souche de Spiruline utilisée et des procédés de culture (Falquet & Hurni 2006).

□ Les minéraux et acides gras

Des enrichissements dans le milieu de culture en Zn, Fe, Se peuvent fortement augmenter la teneur en ces minéraux de la Spiruline. Il est même possible d'enrichir la Spiruline en acides gras (Kiet et al. 1994)

4.1.2 Toxicité

Les cyanotoxines ne seraient pas présentes dans la Spiruline. Il existe aujourd'hui une méthode « Multiplex PCR » (Saker et al. 2007) de détection des gènes impliqués dans la synthèse des microcystines, qui sont des cyanotoxines présentes dans les cyanobactéries.

Des analyses réalisées par un laboratoire indépendant ont montré l'absence de Beta-N-methylamino-L-alanine (BMAA) (voir chapitre 2.3) dans la Spiruline produite par Cyanotech. Cependant il paraît important de vérifier si le gène responsable de la synthèse du BMAA existe dans génome de la Spiruline et si c'est le cas, de connaître les conditions de cultures qui provoquent ou non l'expression du gène (J Blanchot comm. coll. Tuléar 2008). A cause de ce risque, Gantar & Svircev (2008) estiment qu'il vaut mieux extraire les molécules actives de la Spiruline plutôt que la consommer directement.

Tulliez et al. (1975) ont réalisé des recherches sur les risques dus au n-heptadécane présent dans la Spiruline. La rétention de cette paraffine a été mesurée chez des animaux recevant

ces algues comme source unique ou partielle de protéines. Cette rétention est relativement faible. Cependant ces recherches sont anciennes et ont porté sur les rats et les porcs. Des études bénéficiant de technologies et de connaissances nouvelles mériteraient d'être faites.

D'autres molécules comme le cyclitol, capteur de Ca (Quillet 1975), pourraient entraîner une décalcification.

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

Le pH élevé du milieu de culture empêche la prolifération d'autres espèces et de bactéries pathogènes.

Dans un récent ouvrage, Chamorro et al. (2007) rapportent que les évaluations de toxicité sur des animaux nourris à court et long terme avec de fortes doses de Spiruline n'ont pas révélé de toxicité. Ils considèrent qu'il faut cependant être prudent avant d'extrapoler le modèle animal à l'homme.

4.1.3 Législation

La Spiruline répond à la législation sur les compléments alimentaires.

Un récent décret a permis de fournir un cadre juridique complet pour les compléments alimentaires en transposant dans le droit national la majeure partie de la directive européenne n° 2002/46/CE. Ce nouveau décret n° 2006/352 du 20 mars 2006, publié au Journal Officiel du 25 mars 2006, reprend la définition européenne des compléments alimentaires : *« on entend par compléments alimentaires, les denrées alimentaires dont le but est de compléter le régime alimentaire normal et qui constituent une source concentrée de nutriments ou d'autres substances ayant un effet nutritionnel ou physiologique seuls ou combinés, commercialisés sous forme de doses, à savoir les formes de présentation telles que les gélules, les pastilles, les comprimés, les pilules et autres formes similaires, ainsi que les sachets de poudre, les ampoules de liquide, les flacons munis d'un compte-gouttes et les autres formes analogues de préparations liquides ou en poudre destinées à être prises en unités mesurées de faible quantité »*.

L'étiquetage de ces produits doit comprendre la dénomination de vente de « complément alimentaire », ainsi que d'autres informations comme le mode d'emploi détaillé, la dose journalière recommandée, la liste de toutes les substances utilisées lors de la fabrication, les précautions d'emploi. Ces produits doivent être enregistrés par la Direction Générale de la Concurrence, de la Consommation et de la Répression des Fraudes, après une évaluation préalable par l'Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments.

La Spiruline vendue en France est conforme à la législation. Dans plusieurs états africains, une Autorisation de Mise sur le Marché (AMM) est prévue pour la distribution de Spiruline.

4.2 Potentialités et utilisation

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

4.2.1 Spiruline à usage humain

- Pour la santé

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

La Spiruline est vendue :

- ✓ Pour une alimentation équilibrée : par ses apports en micronutriments.
- ✓ Dans les régimes amaigrissants : pour ses taux importants en protéines et en phénylalanine, qui réguleraient l'appétit.
- ✓ Pour l'amélioration des capacités sportives : par ses teneurs en fer, en vitamine B12, et en ß-carotène qui faciliteraient la récupération
- ✓ Pour lutter contre l'asthénie par son apport en oligoéléments et vitamines
- ✓ Pour ses effets sur la sénescence : par les propriétés antioxydantes du ß-carotène, de la phycocyanine et de la vitamine E, elle serait un frein au vieillissement des cellules
- ✓ Pour son activité antioxydante liée à la phycocyanine.
- ✓ Pour son activité anticoagulante liée au *Spirulane Calcique (Sp-Ca)* et au *Spirulane Sodique* (*Sp-Na*).
- ✓ Pour renforcer le système immunitaire grâce aux polysaccharides.
- ✓ Pour son activité antivirale : liée au sulfoquinovosyldiacylglycerol riche en sulfolipides
- ✓ Pour son activité antitumorale liée à la phycocyanine
- ✓ Pour son activité pour diminuer le cholestérol grâce aux acides gras polyinsaturés omega-3 et oméga-6.
- ✓ Pour ses autres actions sur la santé : une diminution du diabète chez l'homme (Parikh et al. 2001) ; une activité anti-inflammatoire sur les articulations (études sur la souris de Remirez et al. 2002) ; une hépato protection ; un effet possible de la molécule *Spirulane-sodique* dans la prévention de l'athérosclérose [L'article de Yamamoto et al. (2006) sur cette dernière action révèle une activation par le Na-Sp du système fibrinolytique endothélial mais ne conclut pas sur le rôle du Na-Sp dans la prévention de cette maladie].

□ Autres utilisations

Le groupe des cyanobactéries produit une variété de métabolites secondaires dans leur milieu de culture (Harrigan & Goetz 2002). Beaucoup de ces produits naturels ont des activités antibiotique, algicide, antiviral, fongicide (Harrigan et al. 1999 ; Jaki et al. 1999 ; Mundt et al. 2001).

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

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

Dans l'aérospatiale, l'agence spatiale européenne (ESA) s'est intéressée à la Spiruline dans le cadre de son programme MELISSA (Micro-Ecological Life Support System Alternative). Ce projet, prévoit d'utiliser dans l'espace un écosystème artificiel fermé[11] composé de plantes supérieures et de micro-organismes, en vue des voyages à longue distance (Terre - Mars par exemple). Commencé en 1989, ce programme implique à présent une dizaine d'équipes dans toute l'Europe et au Canada.

[11] Dans cet écosystème, le cycle de la matière a été réduit au minimum, soit à cinq compartiments : les compartiments consommateur ; liquéfacteur ; photohétérotrophe ; nitrificateur et photoautotrophe. Les plantes supérieures et la Spiruline sont utilisées dans le compartiment photoautotrophe, d'une part pour équilibrer la ration alimentaire, d'autre part pour régénérer l'atmosphère par photosynthèse.

4.2.2 Spiruline à usage animal

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

□ Favoriser la croissance et la fertilité

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

□ Renforcer les défenses immunitaires

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

Des vétérinaires préconisent l'administration de Spiruline à des animaux domestiques.

□ Pour augmenter la pigmentation

La Spiruline est utilisée pour ses pigments :

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

□ Pour améliorer les performances des animaux

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

4.2.3 Spiruline sous forme d'extraits

Un extrait liquide de Spiruline fraîche titrée en phycocyanine a été mis au point par la société Alpha Biotech (Jaouen et al. 1999). Son usage est autorisé en Europe. La phycocyanine extraite de la Spiruline est vendue entre autres comme enzyme.

Des extraits de Spiruline sont commercialisés en combinaison avec des extraits d'algues vertes, pour leurs vertus cicatrisantes, antiseptiques et régénératrices cellulaires. La commercialisation porte soit sur l'extrait brut actif stabilisé, soit sur le produit fini (gels, shampooings, laits). Les marchés concernés sont ceux 1) des produits cosmétiques de soin 2) de la parapharmacie pour le traitement de problèmes dermatologiques 3) des soins vétérinaires.

Le résidu d'extraction de la phycocyanine conserve une valeur nutritive et thérapeutique.

4.3 Le marché de la Spiruline

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

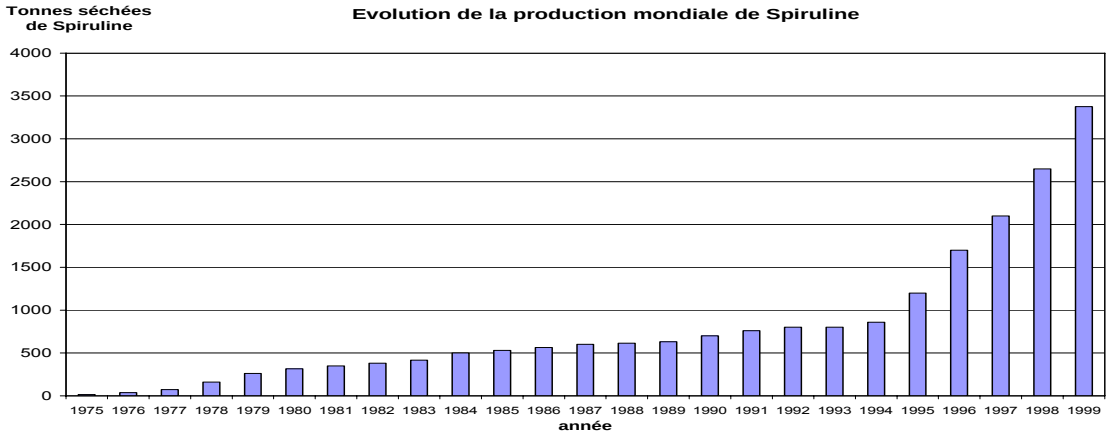


Figure 4 : Evolution de la production mondiale de Spiruline d'après l'étude réalisée en 2000 par Tractebel Consult en association avec le Centre Universitaire de Biotechnologie Algale (CUBIA).

La production mondiale a régulièrement augmenté surtout depuis 1995. Elle serait aujourd'hui supérieure à 4000T.

La Spiruline est commercialisée en poudre sèche à l'état « brut » ou bien intégrée dans les produits finis. Dans le premier cas, elle est généralement vendue sous forme de gélules ou de comprimés, dans le deuxième cas elle est directement intégrée dans les aliments (agroalimentaire) et dans les crèmes (cosmétique).

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

Il n'y a pas à proprement parler de filières de vente. Les grosses entreprises ont leur propre département de distribution. La vente se fait dans les industries agroalimentaires, dans les boutiques de produits naturels, en magasins spécialisés en diététique, parapharmacie, cosmétique, compléments alimentaires pour animaux, dans certains clubs sportifs (body building), dans les rayons spécialisés en aliments de régime des grandes surfaces, sur Internet. En France, les producteurs du sud se sont associés en groupement PASS (Producteurs Associés de Spiruline du Sud) pour vendre une Spiruline artisanale séchée à basse température, de qualité « FILAO ».

La demande en 2000 pour l'usage humain était de 2500 T (70%), pour les colorants alimentaires de 500T (14%), pour l'alimentation animale de 300T (8%), pour les cosmétiques de 300T (8%).

5 LA MALNUTRITION DANS LES PAYS EN VOIE DE DEVELOPPEMENT

5.1 Définitions

La malnutrition est définie comme un état pathologique dû à l'usage prolongé d'une nourriture ne fournissant pas l'ensemble des éléments nécessaires à la santé. Elle touche l'ensemble de la planète (Figure 5). La mauvaise nutrition se manifeste plutôt par des surcharges pondérales dans les pays développés et par des retards de croissance dans les pays en voie de développement. C'est cette forme de malnutrition qui sera développée dans ce chapitre.

Les carences alimentaires peuvent être quantitatives (sous nutrition), qualitatives (manque de micronutriments) ou les deux (le plus souvent) et sont une cause très fréquente de l'état de malnutrition.

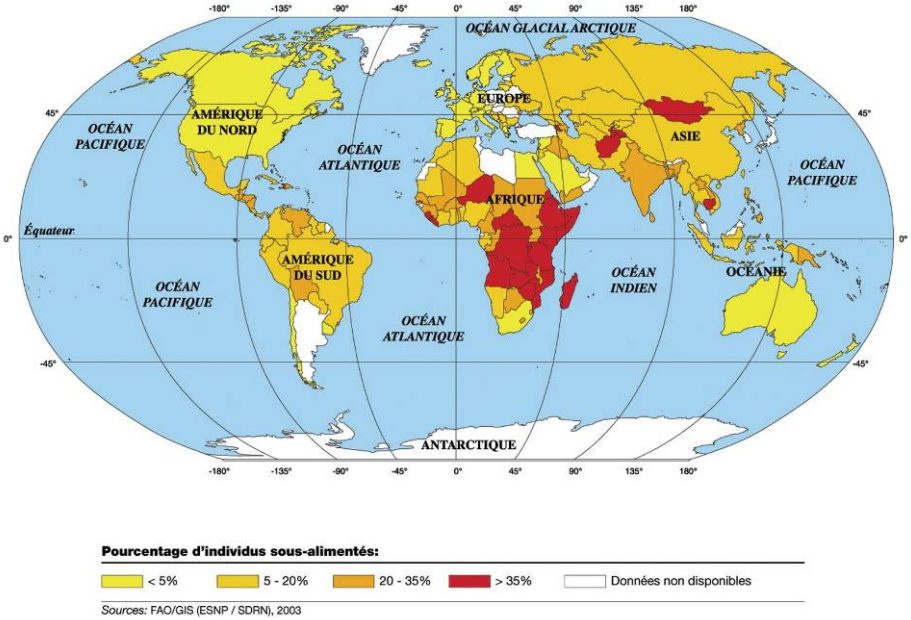


Figure 5: Carte de la faim dans le monde Proportion de personnes sous-alimentées (1998-2000) d'après FAO et Partenaires de NECF (www.feedingminds.org/info/worldmap_fr.htm).

Dans les pays en développement (PED), les carences en micronutriments sont principalement liées au faible contenu et/ou la faible biodisponibilité des micronutriments des régimes alimentaires. Elles représentent un problème de santé publique aux conséquences physiologiques et économiques non négligeables. Les principales carences identifiées concernent les carences en iode, fer et vitamine A, mais d'autres carences comme la carence en zinc, vitamine B12, riboflavine et acide folique co-existent probablement même si leur existence et importance n'ont pas encore été bien étudiées. La carence en fer touche près de 3,5 milliards de personnes à travers le monde principalement les femmes à partir de l'adolescence, les nourrissons et les jeunes enfants. La carence en vitamine A concerne environ 127 millions d'enfants d'age préscolaire dont 4,4 millions présentent des signes de xérophtalmie (affection des yeux se traduisant par un assèchement de la conjonctive et de la cornée et évoluant vers la cécité en l'absence de traitement) et près de 20 millions de femmes enceintes, avec 25-35% des cas recensés en Afrique. La carence en iode concernerait environ 2 milliards de personnes avec près de 740 millions de goitreux et près de 27% de la population mondiale présenteraient une consommation inadéquate en zinc. Dans les PED, ces différentes carences sont rarement isolées et souvent additionnelles.

Les pathologies les plus graves et les plus fréquentes liées aux carences alimentaires sont le kwashiorkor (troubles physiques : visage pâle et bouffi, œdèmes des membres,…) et le

marasme (succession d'infections et de diarrhées). Environ 20 millions d'enfants entre 1 et 5 ans seraient atteints dans le monde.

D'autres pathologies se manifestent dont l'anémie due aux carences en fer, responsable de 20% des décès maternels dans sa forme la plus sévère, la cécité due aux carences en vitamine A, le retard intellectuel dû au manque d'iode, les problèmes de croissance dont le rachitisme dus aux carences en iode et zinc.

Selon l'OMS et l'UNICEF, un enfant sur trois en Afrique et un enfant sur cinq en Asie souffrent de malnutrition. Ils sont, la plupart du temps, victimes d'un manque de vitamines et autres micronutriments qui peuvent provoquer des conséquences irréversibles s'ils ne sont pas pris en charge suffisamment tôt.

La période la plus sensible est celle de 6 mois à 3 ans, classe d'âge où les besoins pour la croissance sont les plus importants. Douze millions d'enfants meurent chaque année avant d'atteindre l'âge de 5 ans soit 32 000 par jour (Source OMS). Dans les PED, un enfant de moins de cinq ans sur quatre souffre d'insuffisance pondérale, soit au total quelque 146 millions d'enfants, sur la base des estimations les plus récentes. Près des trois quarts de ces enfants vivent dans seulement 10 pays (Bilan sur la nutrition Avril 2006 UNICEF www.unicef.fr/mediastore/7/1767-4.pdf).

Chez les adultes, l'anémie causée par le manque de fer entraîne chaque année la mort de 60 000 jeunes femmes pendant leur grossesse ou leur accouchement.

Les implications économiques de ces carences sont loin d'être négligeables : baisse de la force productive, augmentation des coûts de santé, perte de capital humain et social et diminution du PNB. Leur importance en termes de santé publique et leurs conséquences sur la santé de l'individu justifient la mise en œuvre d'interventions.

De nombreuses organisations à but humanitaire tentent de limiter ce fléau qui ne cesse de s'accroître. Certaines voient en la Spiruline un moyen de lutter contre la malnutrition.

5.2 Stratégies pour lutter contre la malnutrition

Les principales causes de la malnutrition dans les PED apparaissent être la pauvreté, le naufrage de l'agriculture et l'ignorance nutritionnelle. Les organismes internationaux développent des stratégies pour prévenir la malnutrition en mettant en place des systèmes d'alertes précoces (SAP) reposant principalement sur l'estimation des productions agricoles et, via la surveillance des prix, sur l'appréciation de l'accès aux aliments. L'éducation nutritionnelle fait partie des actions des organismes de santé nationaux et internationaux. Ces stratégies préventives permettent de limiter les crises alimentaires mais ne suffisent pas à les éradiquer. Il faut aussi gérer les situations d'urgence et développer des traitements en structures médicales.

Nous nous réfèrerons principalement aux stratégies de lutte contre la malnutrition chez les enfants de 6 mois à 3 ans.

5.2.1 La prévention

Dans les PED, la malnutrition entraîne un retard de croissance qui chez le jeune enfant s'accompagne de nombreuses conséquences néfastes : augmentation du risque de mortalité, diminution des défenses immunitaires, retard du développement moteur, diminution des capacités cognitives et d'apprentissage à l'école (Bruyeron et al. 2006). Sur cette base des instituts et ONGs ont fait le choix d'intervenir en prévention de la malnutrition infantile. Cette prévention est basée sur le couplage éducation nutritionnelle des populations et mise à disposition d'aliments de complément.

L'éducation nutritionnelle consiste à inciter les populations à avoir une nutrition diversifiée et riche en micronutriments. La consommation de produits cultivables localement et le développement de leur culture sont encouragés, mais aussi, si nécessaire, l'utilisation d'aliments de complément. En effet, la substitution trop précoce de l'allaitement maternel par des aliments inadaptés, est un facteur déterminant de la malnutrition.

Un aliment de complément (au sens programme FASEVIE NUTRIDEV) est un aliment donné aux jeunes enfants en complément du lait maternel. Il doit être introduit dans l'alimentation idéalement lorsque les enfants atteignent l'age de 6 mois, c'est-à-dire à partir du moment ou le lait maternel n'est plus suffisant pour couvrir l'intégralité de leurs besoins nutritionnels. Les compléments alimentaires doivent être le plus complets et le moins cher possible pour être distribués ou vendus à bas prix pendant la période critique de croissance du jeune enfant. Ils doivent aussi être acceptés le plus facilement possible par les mères. Au Vietnam, un complément alimentaire, la Favilase, a été mis au point pour être rajouté à des bouillies ou des pseudo-bouillies à base de riz. La Favilase est constituée de 87.7 % de Soja, 6.1% de phosphate de calcium, de 3.1% de sels, d'un enzyme (amylase) et pour 3,5 % d'un mélange de vitamines et minéraux. Le Supplétal est un autre exemple de ce type de compléments (Sall et al. 1992). Des produits naturels tels les extraits foliaires de Luzerne, les feuilles de Moringa, la Maca, l'huile de Palme Rouge, la Spiruline sont aussi utilisés pour limiter les carences en micronutriments. Des compléments alimentaires type Sprinkles sont utilisés pour suppléer à des carences alimentaires spécifiques.

Les nutritionnistes ont aussi élaboré des farines complètes pour cette même période de sevrage : Favina au Vietnam et Koba Aïna à Madagascar.

5.2.2 Les traitements en structures médicales

Les enfants présentent les troubles de la malnutrition (kwashiorkor, marasme) et sont traités en structures médicalisées.

Nous prenons pour exemple les deux pays africains visités en novembre 2007 lors d'un voyage d'étude, le Burkina Faso et le Niger. Ces pays suivent depuis 2005 une stratégie de traitement de la malnutrition sur les recommandations de l'UNICEF.

La malnutrition est hiérarchisée en malnutrition sévère et modérée. Le protocole de traitement se fait en trois phases :

- ✓ Phase 1 : réhabilitation en structure hospitalière, pour les enfants atteints de malnutrition sévère avec complications et maladies. Des laits F75 et F100 (Nutriset) leur sont administrés.
- ✓ Phase 2 : récupération dans les Centres de Réhabilitation et d'Education Nutritionnelle (CREN au Burkina Faso), pour les enfants atteints de malnutrition modérée, lorsque les symptômes de la maladie ont disparu. Des sachets individuels prêts à l'emploi de Plumpy'nut (Nutriset) ou des compléments minéraux et vitaminiques (CMV) sont distribués aux enfants. Le temps de séjour va de 12 jours à un mois.
- ✓ Phase 3 : fortification (suite de récupération nutritionnelle). Pendant cette phase dite ambulatoire, les enfants sont de retour au foyer. Ils reviennent une fois par mois pour contrôle et réapprovisionnement éventuel en compléments nutritionnels

Les mères accompagnent leurs enfants dans les 3 phases et des agents de la santé leur apprennent à distribuer une nourriture adaptée aux besoins de leurs enfants. Au Burkina Faso, les CREN sont équipés de cuisines où les mères apprennent avec des agents de la santé à composer pour leurs enfants des farines variées enrichies d'ingrédients, produits localement de préférence, choisis pour leurs apports en vitamines et micronutriments.

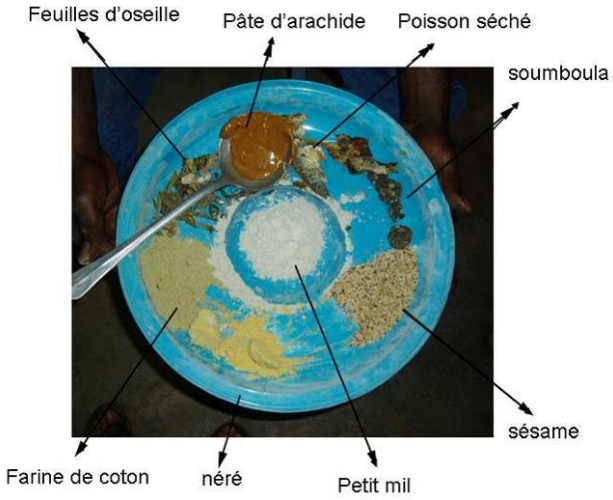


Figure 6: ingrédients présentés au CREN de Gondogolo (Burkina Faso)

5.3 Place de la Spiruline pour lutter contre la malnutrition

La Spiruline est utilisée pour lutter contre la malnutrition par les ONGs : les 3 principales sont Antenna Technologie France, Technap, Codegaz. Elles se sont basées sur la composition de cet organisme en micronutriments, son potentiel pour la santé et le fait qu'il soit cultivable localement. Elles ont développé les procédés de culture et leur action se poursuit, confortée par les témoignages des personnes qui utilisent la Spiruline. Malgré leurs efforts, la Spiruline n'a jamais été utilisée à grande échelle par les organismes internationaux de la santé.

Dans ce chapitre nous parlerons de l'utilisation de la Spiruline en Afrique, de la position des organismes internationaux, et nous analyserons les raisons de leur réticence. Nous situerons la Spiruline dans une approche alimentaire.

5.3.1 Utilisation actuelle de la Spiruline en Afrique

Nous nous basons sur 3 pays visités en 2007 et 2008 : Burkina Faso, Niger, Madagascar.

- Au Niger : l'Etat déclare avoir mobilisé les Ministères de la Santé, de l'Environnement, de l'Agriculture et de la Coopération sur l'intérêt de la Spiruline dans le domaine de la malnutrition. La Spiruline est officiellement reconnue comme Médicament Traditionnel Amélioré (MTA) et les fermes peuvent bénéficier d'une Autorisation de Mise sur le Marché (AMM). Dans les Centres de Santé Intégrés (CSI), la Spiruline est distribuée en phase 2, à défaut de dons de Plumpy'nut. Un regain d'appétit est unanimement constaté chez l'enfant dénutri. A bas prix, les mères la privilégient en phase ambulatoire lorsqu'elles la voient cultiver localement. La distribution de Spiruline est envisagée par le personnel médical comme une solution durable. Des travaux de recherche (thèses) sont en cours sous la direction des Dr. Degbey et Pr. Hamani, sur l'impact de la Spiruline sur la malnutrition et sur la drépanocytose.
- Au Burkina Faso : le Ministère de la Santé a financé le projet Spiruline « Nayalgué » dans l'objectif de contribuer à l'amélioration de la santé de la population grâce à l'utilisation de la Spiruline. Elle serait intégrée dans un programme diversifié de lutte contre la malnutrition. Sa culture locale montrerait aux populations qu'elles peuvent agir sur leur développement. La Spiruline ne fait cependant pas partie du protocole officiel de traitement de la malnutrition. Distribuée dans les CREN de préférence en phase 2 (elle serait trop protéinée pour les malnutris sévères), la Spiruline apporterait aux enfants un regain d'appétit, est reçue comme un bienfait par les mères qui la considèrent comme une « vitamine ». Les médecins lui attribuent une action préventive à la malnutrition lorsqu'il est possible de se la procurer localement en complément de la nourriture de base. Ils l'utilisent aussi en phase de récupération, à raison d'une cuillerée de 2 à 3g /

jour. Au Centre de Traitement Ambulatoire (CTA) de Ouagadougou elle est prescrite par trois médecins en accompagnement des traitements aux Anti Rétro-Viraux (ARV), aux personnes atteintes du VIH SIDA. Elle apporterait 1) un gain de poids 2) un gain en lymphocytes CD4 3) une diminution des infections opportunistes. Plusieurs travaux de recherche ont été publiés par Simpore et al. (2005, 2006, 2007), le plus récent portant sur les effets de la Spiruline sur les défenses immunitaires des enfants malnutris atteints du VIH. Le Ministère de la santé a lancé une série d'études épidémiologiques et cliniques sur l'efficacité de la Spiruline. Des recherches sur l'amélioration de la culture de Spiruline sont en cours.

- A Madagascar : nous n'avons pas connaissance du positionnement des autorités malgaches vis-à-vis de la Spiruline. Cependant des représentants nationaux de la nutrition (Office National de Nutrition) et de la santé (Ministère) ainsi que des autorités régionales de Tuléar dont Mme la Sénatrice, M. le Maire, M. le Président de l'Université, M. le Directeur de l'Institut Halieutique et des Sciences de la Mer (IHSM), étaient présents au colloque international « Spiruline et développement » qui s'est tenu à Tuléar les 28-30 avril 2008. Une quinzaine de médecins et nutritionnistes nationaux ont participé à cet événement. La Spiruline est distribuée dans quelques CREN depuis au moins 5 ans et de plus en plus dans les dispensaires. Des recherches sont menées à l'IHSM de Tuléar, sur la biodiversité fongique dans les bassins de culture de Spiruline (CE Raheriniaina comm. coll. Tuléar 2008) et à l'école supérieure des sciences agronomiques (ESSA) d'Antananarivo, sur l'administration de Spiruline aux poulets de chair (JM Razafindrajaona et al comm. coll. Tuléar 2008).

5.3.2 Analyses des études d'efficacité

□ Introduction

L'efficacité d'une intervention peut être évaluée à un double niveau (Berger 2006) :

- ✓ en conditions contrôlées ("efficacy" en anglais)
- ✓ et en conditions réelles ("effectiveness")

L'évaluation en conditions contrôlées a pour objectif de déterminer si l'intervention est efficace ou plus efficace qu'une autre dans des conditions idéales. Une bonne étude repose sur une étude randomisée, réalisée en double-aveugle, incluant un groupe témoin et dans lequel la consommation régulière et en quantités appropriées de l'aliment enrichi ou non ou du supplément est rigoureusement contrôlée. Les variables ou indicateurs mesurés peuvent être des variables biologiques comme la mesure de la concentration en hémoglobine ou en micronutriments ou des variables fonctionnelles comme la croissance ou les performances intellectuelles ou physiques.

Démontrer une efficacité en conditions contrôlées ne garantit pas que le programme aura un effet lorsqu'il sera mis en œuvre. Il est donc indispensable d'évaluer l'efficacité du programme dans les conditions réelles du terrain. Cette évaluation est réalisée après la mise sur le marché et la promotion du supplément ou de l'aliment enrichi ou de la stratégie proposée. La méthodologie utilisée repose le plus souvent sur la comparaison de deux sites dont seulement un bénéficie de l'intervention et/ou sur des évaluations avant-après intervention sur les mêmes sujets ou des sujets différents. Elle requiert en général des échantillons de population plus importants voire des communautés entières. Aux variables précédemment mesurées peuvent s'ajouter d'autres paramètres comme la consommation d'aliment enrichi par les populations cible. Cette évaluation, réalisée le plus souvent sur des périodes assez longues, peut permettre, si les bons indicateurs sont choisis, de mettre en évidence d'éventuels effets positifs ou négatifs des interventions. Ce type d'évaluation, bien que pas toujours réalisé, constitue un argument essentiel pour convaincre les décideurs politiques et les bailleurs de fond à investir dans des actions de nutrition publique.

□ Les études d'efficacité sur la Spiruline

Nous avons fait une recherche exhaustive sur les essais cliniques portant sur l'efficacité de la Spiruline pour lutter contre la malnutrition. Nous n'avons retenu que ceux qui ont fait l'objet d'une publication dans des revues scientifiques, des ouvrages accessibles ou des actes de colloque.

Ces essais sont très peu nombreux et concernent le plus souvent un faible nombre d'individus. Parmi ces expériences, seule l'une d'entre elles a été publiée dans une revue à comité de lecture.

- *Etude du docteur H. Degbey au Niger*

Au Niger, H. Degbey (Degbey, et al. 2006) a testé l'efficacité d'un régime alimentaire à base de bouillie de mil (alimentation quotidienne) supplémentée en Spiruline chez des enfants présentant une malnutrition protéino-énergétique sévère.

Cette étude a porté sur 56 enfants, âgés de 6 à 24 mois révolus, admis dans le service de pédiatrie A de l'hôpital national de Niamey. Ces enfants ont été sélectionnés selon les critères de l'indice poids pour taille. Parmi les 56 enfants, 45 étaient atteints de marasme, 3 de kwashiorkor et 8 d'une forme mixte. Chacun de ces enfants a reçu durant 2 semaines, 10 gr de Spiruline en poudre répartis en 2 prises journalières mélangées à la bouillie de mil.

Les variables mesurées étaient : la masse pondérable, des signes cliniques (lésions, oedèmes, muguets, vomissements etc.), la protidémie, l'albuminémie, la préalbuminémie, la concentration en hémoglobine

Les observations suivantes ont été faites :

✓ Une augmentation significative de la masse pondérale, avec une progression de + 6,80% et + 4,54% pour les enfants atteints respectivement de marasme et de la forme mixte,

✓ une baisse modérée du nombre d'épisodes de diarrhées et de vomissements,

✓ une très nette amélioration au bout de 14j, de la protidémie (+30%), l'albuminémie (+60%), et l'hémoglobine (+4,5%). Le pré albuminémie augmente chez les enfants sans diarrhée (70%) mais diminue chez les enfants avec diarrhée (-6,7%),

✓ une baisse de la leucocytose (augmentation anormale des leucocytes) de 19%,

✓ La mortalité observée au cours de cette étude a été de seulement 11%, un taux largement inférieur à celui de 30% observé dans le même service pour les mêmes types de pathologies.

Les auteurs considèrent que la supplémentation nutritionnelle par 10g par jour de Spiruline constituerait une solution pour des programmes de récupération nutritionnelle.

Analyse critique : Cette étude a été publiée dans des actes de colloque et non dans une revue de renommée internationale avec comité de lecture. Il n'y a pas de groupe témoin. Il n'est donc pas possible de savoir si la récupération provient de la bouillie de mil ou de l'ajout de Spiruline. Enfin, elle porte sur un faible effectif d'enfants traités (56)

- *Etude de Simpore et al. (2006) au Burkina Faso*

Une étude récente (Simpore et al. 2006) a permis de comparer l'intérêt nutritionnel de régimes composés de Spiruline (*Spirulina platensis*) cultivée artificiellement au Burkina Faso, et/ou de Misola. Le Misola est une mixture composée de millet (60%), de soja (20%), de cacahouète (10%), de sucre (9%) et de sel (1%).

Les travaux ont porté sur 550 enfants malnutris de Ouagadougou, âgés de moins de 5 ans. 455 étaient atteints de marasme sévère, 57 de marasme à sévérité moyenne et 38 de kwashiorkor associé au marasme (forme mixte). Les enfants ont été divisés aléatoirement en 4 groupes (A, B, C, D) et chacun des groupes a reçu une ration alimentaire différente distribuée 4 fois par jour (6h30, 10h30, 14h30, 18h30), cela pendant 8 semaines. Le groupe D est constitué d'enfants exclusivement nourris de millet, fruits et légumes (nourriture traditionnelle) selon le souhait de leurs mères. Il constitue ainsi le groupe témoin. Le statut

initial anthropométrique est sensiblement le même pour l'ensemble des groupes, à l'exception du HAZ pour le groupe B (-2,64)

Une amélioration du poids en fonction de la taille (WHZ) et de l'âge (WAH), est observée chez touts les enfants, particulièrement ceux du groupe C (62,90% pour le WHZ et 38% pour le WAZ), dont le régime alimentaire était constitué de Spiruline et de Misola. Le gain de poids quotidien des enfants est respectivement de 20g j^{-1}, 25g j^{-1} et 34g j^{-1} pour les groupes A, B, et C contre seulement 15g j^{-1} pour le groupe D.

L'étude conclut que le Misola, la Spiruline additionnée à la nourriture traditionnelle ou encore la Spiruline additionnée au Misola sont de bons régimes alimentaires pour les enfants sévèrement malnutris. Le régime associant Spiruline et Misola donne les meilleurs résultats car il associe le Misola avec un fort apport calorique (61% de glycides avec 410 kcal/100g contre 13,84% avec 338 kcal/100g pour la Spiruline) et la Spiruline avec une grande richesse en protéine (57,10% dans l'étude contre 16% pour le Misola). Cette association donne 767±5 kcal.j^{-1} et 33,3±1,2 g.j^{-1} de protéine.

Analyse critique : Cette étude a été publiée dans un journal en ligne et en accès libre (Nutrition Journal) dont le facteur d'impact affiché (2.02) n'est pas officiel. Elle inclut un groupe témoin, cependant les groupes testés ne sont pas comparables au début de l'étude : le WHZ n'est pas le même au départ d'un groupe à l'autre (-1.73 à -3.05). Or le suivi de l'évolution du WHZ est un indicateur de la phase de récupération d'un enfant (plus l'état de malnutrition de l'enfant est mauvais, plus la prise de poids est rapide). Les analyses statistiques ne nous paraissent pas convaincantes.

- *Etude de Branger et al. (2003) au Burkina Faso*

Branger et al. (2003) ont étudié l'efficacité de la complémentation en Spiruline pendant 3 mois chez 182 enfants malnutris âgés de 3 mois à 3 ans dans la province de Koudougou.

Les sujets concernés, répartis aléatoirement en 3 groupes, étaient des enfants ayant un Z-score inférieur à 2 ou présentant des œdèmes. Le groupe témoin était soumis à une renutrition habituelle, le deuxième groupe prenait en plus 5 g de Spiruline par jour et le troisième prenait du poisson, en plus des 5 g de Spiruline et du régime habituel.

Les résultats obtenus après 90 jours ne révèlent aucune différence significative entre les trois groupes pour l'indice taille/age, poids/taille et les mesures de Z-score. Les auteurs concluent que la Spiruline à la dose de 5g j^{-1} pendant trois mois n'apporte aucun bénéfice par rapport à la renutrition traditionnelle.

Analyse critique : Cette étude a été réalisée avec un groupe témoin. Ses conclusions ont été vivement critiquées par des ONGs dans les Lettres à la Rédaction du journal de parution de cet article [Archives de pédiatrie (2004) 11 460-469]. Notamment le fait qu'aucun contrôle des doses données aux mères pour distribuer à leurs enfants n'a été effectué. D'après une enquête, la Spiruline était bien remise aux mères, mais rien n'atteste qu'elle ait été administrée aux enfants qui n'étaient pas hospitalisés, mais libérés après consultation.

- *Etude de Sall au Sénégal*

Un essai de réhabilitation nutritionnelle avec la Spiruline a été mené en 1995 sur 59 enfants sévèrement malnutris du service de Médecine Infantile du CHU de Dakar et du Centre de Récupération Nutritionnelle du dispensaire St Martin (Sall et al. 1999).

Parmi les 59 enfants, 17 étaient atteints de kwashiorkor, 35 de marasme et 7 de kwashiorkor marasmique (forme mixte). Chaque enfant 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 l'étude montrent un taux de guérison de 88,1%, une mortalité de 6,78% et une évolution anthropométrique (gain en poids de 50 gr/jour), clinique et biologique significative.

Après la réhabilitation nutritionnelle, le taux d'hémoglobine a augmenté de façon significative ($p<0,05$). Ces résultats hématologiques sont meilleurs comparés à ceux obtenus avec le

"rouye" complet (Guiro et al. 1987) ou le Nesmida (Sall et al. 1989). Dans l'étude, les enfants avaient un taux initial de préalbumine qui était très bas, celui-ci a évolué dès le 8ème jour de réhabilitation pour atteindre 19±1,8 mg/dl à J30 soit un pourcentage de récupération de 175,5 % (valeur normale de la préalbumine = 16 mg/dl). En ce qui concerne l'apolipoprotéine AI qui est considérée comme un bon marqueur de l'état nutritionnel, elle a connu une progression significative en passant de 0,85±0,33 g/l à l'entrée à 1,17±0,38 gr/dl à la sortie (normale = 1g/1). Les résultats du bilan protidique montrent donc une amélioration très nette des marqueurs.

Les auteurs concluent qu'un ajout de Spiruline permet une prise pondérale satisfaisante et une normalisation des marqueurs biochimiques.

Analyse critique : Cette étude a été publiée dans la revue Médecine d'Afrique noire. Elle n'a pas été réalisée avec un groupe témoin.

□ Conclusions sur les études cliniques

Les études recensées sont peu nombreuses (4), la moitié ont été réalisées sans groupe témoin. Elles portent sur des effectifs assez faibles, utilisent des protocoles discutables et n'ont pas toutes été publiées dans des revues à comité de lecture. Dans l'état actuel les expériences cliniques n'apportent ni preuves d'efficacité, ni preuves d'inefficacité. Elles ne peuvent donc convaincre les acteurs de la santé de l'utiliser dans leur stratégie de lutte contre la malnutrition.

□ Autres expériences

Dans ce chapitre nous mentionnons quelques expériences dont les résultats nous paraissent intéressants, mais dont les publications ne sont pas toujours accessibles.

Deux études ont été réalisées en Inde au Madurai Medical College, sur :

✓ « Preschool nutrition supplementation and family income booster by Spirulina » par le Dr K. Venkata Subramanian et le Pr N. Edwin du Madurai Medical College (Von der Weid 2006). L'étude réalisée en double aveugle, avec un groupe témoin, conclut au bout de 3 mois d'expérience, à un gain de poids supérieur chez des enfants supplémentés en Spiruline à raison de 1g/j, ainsi qu'une augmentation des taux en Fe, Mg et Zn significativement plus élevée que pour le groupe témoin. Cette étude a été publiée dans un ouvrage en Inde. Nous n'avons eu accès qu'à un texte, soumis à une revue dont nous ignorons l'appellation. Trop d'imprécisions sur l'origine de cette publication et les analyses statistiques employées, ne nous permettent pas de donner un avis sur ces résultats.

✓ L'étude sur les qualités potentielles de renutrition par la Spiruline sur une population d'enfants malnutris, présentée en octobre 1999 lors du 7^{ième} congrès mondial sur la nutrition clinique par le Dr Thinakar Vel et le Pr Dr N Edwin. Cette étude a porté sur 80 enfants de 1 à 6 ans: 30 d'entre eux ont constitué le groupe témoin et 50 le groupe d'essai. Les enfants du groupe d'essai ont reçu chaque matin avec leur premier repas 1 g de Spiruline pendant six semaines ; ceux du groupe témoin un placebo. Les résultats obtenus concernent les six critères de dosages sanguins (hémoglobinémie ; protéines sériques ; sidérémie ; capacité sérique de fixation du fer ; ferritine sérique ; rétinol sérique). Après les six semaines de thérapie, les auteurs observent une amélioration de l'état général des enfants traités avec 1g de Spiruline : irritabilité diminuée, vigilance accrue, meilleurs appétit et sommeil. Ils constatent aussi l'amélioration significative de l'hémoglobinémie (dans 90% des cas), des protéines sériques (90%), de la sidérémie (78%), de la ferritine sérique (86%) et du niveau du Rétinol sérique (78%).

Dans le chapitre « Essais nutritionnels chez l'homme » de Falquet & Hurni (2006), des expériences positives de réhabilitation nutritionnelle avec la Spiruline sont rapportées. Parmi celles-ci, a) l'expérience de renutrition infantile portant sur près de 600 enfants de Bangui (RCA) de 0-5 ans, avec un mélange 5g Spiruline+sardine (Dupire 1998) b) l'expérience de

Seshradi et al. (1993) montrant la disparition spectaculaire de la « tache de Bitot[12] » après l'administration quotidienne à 5000 enfants en âge pré-scolaire, de 1g de Spiruline pendant 5 mois c) l'expérience de réhabilitation nutritionnelle comparative portant sur 84 enfants HIV-positifs et 86 HIV-négatifs (Simpore et al 2005) montrant l'impact favorable de la Spiruline dans la renutrition d'enfants infectés par le virus du SIDA.

Une étude de réhabilitation nutritionnelle par la Spiruline a été présentée au XXIIième colloque de l'IVAGG « International Vitamin A consultative group meeting » (Lima les 15-17 nov 2004) (Razafiarisoa et al.2004, http://ivacg.ilsi.org/file/IVACGPeruFINALREPORT.pdf). Les auteurs concluent sur l'effet positif de l'apport direct de Spiruline, pour réduire la déficience en Vitamine A et la malnutrition protéino-énergétique chez les enfants malgaches.

5.3.3 Position de la Spiruline en tant que complément alimentaire

Dans ce chapitre nous évaluons l'intérêt de la Spiruline comme complément minéral et vitaminique susceptible d'être utilisé dans des farines enrichies. Pour cela, nous comparons les apports en micronutriments de la Spiruline avec les besoins recommandés. Nous calculons ensuite le coût d'un enrichissement d'une farine avec de la Spiruline et le comparons à celui d'un autre CMV. La dose de Spiruline donnée aux enfants par les ONG varie de 1 à 10 g par jour. Nous avons basé nos calculs sur une dose de 1 g pour permettre d'évaluer la dose nécessaire pour répondre aux besoins en micronutriments.

□ Apport en nutriments par 1 g de Spiruline

Nous avons construit, à partir du Tableau 1 de Lutter & Dewey (2003) complété pour la biotine et la vitamine E par les informations trouvées sur le site de l'IOM (Institute of Medecine) et la composition de la Spiruline du chapitre 2.2.5, un tableau comparant les teneurs journalières recommandées en nutriments (TRN) pour un enfant de 6 à 23 mois avec les teneurs en vitamines et sels minéraux contenus dans 1g de Spiruline.

On constate dans le Tableau 6 que 1 g de Spiruline pourrait apporter suffisamment de :

- ✓ vitamine A. Rappelons que la Spiruline ne contient pas de la vitamine A sous forme libre, mais du β-carotène (provitamine A), précurseur de la vitamine A. Un excès de carotène n'est pas toxique et peut être converti en vitamine A si nécessaire.
- ✓ vitamine B12. Rappelons que la plage de teneur donnée concerne la vitamine B12 hors la pseudo-vitamine B12.
- ✓ manganèse

Il faudrait une dose de 10 g pour espérer combler les besoins en :

- ✓ B3
- ✓ B2
- ✓ B1
- ✓ Fe
- ✓ Phosphore

En outre, la Spiruline peut apporter des quantités non négligeables en :

- ✓ vitamine E
- ✓ Calcium
- ✓ Cuivre
- ✓ Magnésium

Le reste des vitamines et éléments minéraux est fourni par le lait maternel et les bouillies.

[12] Symptôme de grave déficience en vitamine A

Tableau 6 : Plages des besoins en micronutriments pour un enfant de 6 à 23 mois extraites du Tableau 1 de Lutter et Dewey (2003) comparées avec celles des teneurs en vitamines et sels minéraux contenus dans 1g de Spiruline.

Vitamine et minéraux	Besoin journalier	Teneur dans 1 g de Spiruline
Vitamine A (µg)	300-500	156-378*
B8 (Biotine) (µg)	6-8**	0.05
B9 (Folate) (µg)	32-160	0.5
B3 (Niacine) (mg)	1.5-8	0.13
B5 (Pantothénate) (mg)	1.7-2	0.005-0.025
B2 (Riboflavine) (mg)	0.4-0.6	0.03-0.05
B1 (Thiamine) (mg)	0.2-0.5	0.035-0.05
B6 (Pyridoxine) (mg)	0.3-0.7	0.005-0.008
B12 (Cobalamine) (µg)	0.4-0.9	0.1-0.34***
C (Acide ascorbique) (mg)	15-50	0
Vitamine E (Alpha-tocophérol) (mg)	5-6****	0.013-0.19
Calcium (mg)	270-525	1.3-14
Cuivre (mg)	0.2-0.4	0.008-0.010
Iodine (µg)	21-130	0
Fer (mg)	7-11	0.58-1.80
Magnésium (mg)	54-85	2-3
Manganèse (mg)	0.02-1.2	0.03-0.04
Phosphore (mg)	54-460	6.7-9.0
Potassium (mg)	275-800	6.4-15.4
Selenium (µg)	10-20	0*****
Sodium (mg)	320-500	4.5
Zinc (mg)	3-4	0.02-0.04

* Vitamine A provenant du β-carotène (4.5 µg β-carotène apporte 1 µg vitamine A)

** d'après http://www.iom.edu/Object.File/Master/7/296/0.pdf

*** hors pseudo vitamine B12

**** d'après : Office of Dietary Supplements (National Institute of Health, USA) http://ods.od.nih.gov/factsheets/vitamine.asp

***** sauf enrichissement

□ Comparaison le coût d'enrichissement par la Spiruline et par un CMV

Nous prendrons comme exemple de comparaison le Koba Aïna développé à Madagascar dans le cadre du programme NUTRIMAD. Cette farine enrichie doit être prise à raison de 3 sachets de 35 g par jour pour couvrir l'intégralité des besoins en micronutriments en complément au lait maternel. Le prix de vente de cette dose journalière est de 0.114 € pour un prix de revient maximum de 0.09 €. Le coût de la fortification représente 6 % soit 0.005 €.

Un gramme de Spiruline coûte au plus bas prix 0,016 € (coût de revient minimum à Madagascar en 2007) soit 3,2 fois plus cher que la fortification journalière du Koba Aïna.

□ Un atout possible : son potentiel thérapeutique

Nous avons vu dans le chapitre 2.2 que la Spiruline contient des molécules pouvant présenter un intérêt pour la santé (antioxydante, antitumorale, antivirale, immunostimulante etc.). Ces molécules pourraient aider à renforcer les défenses immunitaires affaiblies par la malnutrition. Plus particulièrement, l'enfant malnutri ayant un système immunitaire encore immature est la cible privilégiée d'infections souvent mortelles.

Cependant, jusqu'à présent, il n'y a aucune preuve scientifique que ces substances puissent avoir un effet positif sur un enfant, à la dose de 1 à 10 g de Spiruline par jour.

5.3.4 Positions des organismes internationaux sur la Spiruline

□ L'ONG Hellen Keller International (HKI)

Constitué de nutritionnistes, agronomes, infirmiers, personnels de la communication, HKI fait essentiellement de la prévention et de la formation d'agents de santé. Son action dans le domaine de la nutrition porte sur la prévention avec la promotion de l'allaitement, de la diversification alimentaire à base de produits locaux et de la complémentation si nécessaire. Elle intervient ponctuellement dans les traitements d'urgence.

La Spiruline, cultivable localement, est considérée par HKI comme un produit local que l'on peut promouvoir.

□ L'ONG Groupe d'Echange et de Recherche Technologique (GRET)

Dans le domaine de la nutrition, le GRET travaille avec l'IRD sur le programme Nutridev[13]. L'objectif de ce programme est de tester et valider des solutions alimentaires pérennes pour proposer aux populations démunies une couverture quotidienne de leurs besoins nutritionnels. Il s'agit de mettre au point des farines de base avec les produits locaux, enrichies avec un CMV au meilleur rapport qualité / prix ; faire fabriquer ces farines enrichies par des entreprises locales ; assurer l'éducation nutritionnelle des mères.

La Spiruline est considérée comme non concurrentielle par rapport aux CMV tant au niveau du coût qu'en apports nutritionnels. Pour le GRET, quels que soient les avantages démontrés ou démontrables de la Spiruline par rapport aux CMV, le coût, la difficulté de fabrication et les problèmes d'acceptation ne permettent pas de retenir la Spiruline comme une solution adaptée à une lutte contre la malnutrition.

□ Position de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS)

La position de l'OMS a été clairement donnée aux ONGs par courrier : l'OMS ne recommande pas la Spiruline comme solution pour lutter contre la malnutrition.

□ Position du Programme Alimentaire Mondial (PAM)

Le PAM a exploré en 2007 la possibilité d'inclure la Spiruline dans son programme alimentaire. Il nous a transmis les conclusions du Technical Advisory Group[14] (TAG) qui a récemment évalué une demande d'un producteur de Spiruline, pour l'approbation du produit à l'usage des programmes du PAM. La position actuelle du PAM à la suite de cette expertise basée sur une synthèse bibliographique, est:

Tant que 1) il n'y a pas de garanties sur la qualité de la production, 2) il n'y a pas de preuves scientifiques de son efficacité pour lutter contre la malnutrition et 3) que la Spiruline n'est pas reconnue par une agence de contrôle alimentaire telle la Food and Drug Administration (FDA), le PAM ne pourra pas inclure la Spiruline dans ses programmes alimentaires.

□ Position d'Action contre la Faim (ACF)

ACF considère qu'avant de promouvoir de la Spiruline il faut faire plusieurs études cliniques. Celles-ci doivent comporter un groupe témoin et doivent être réalisées sur un large effectif. ACF pourrait participer à une telle étude en distribuant de la Spiruline si les critères de non toxicité et de qualité sont respectés et clairement affichés.

□ Position de la FAO

La FAO s'intéresse à la production traditionnelle de Spiruline au Tchad en tant que facteur de développement. Elle participe au projet initié en 2007 dénommé « projet pilote de développement de la filière dihé au Tchad », financé par la Commission Européenne.

---

[13] http://www.gret.org/ressource/pdf/Nutridev.pdf

[14] Le Tag est un groupe d'experts scientifiques indépendants spécialisés dans les domaines de la sécurité alimentaire, de la nutrition et de la législation sur la nourriture.

6 CONCLUSIONS

Place de la Spiruline dans la lutte contre la malnutrition ?

La Spiruline ne nous apparaît pas éligible pour la fabrication des aliments distribués par les services de santé nationaux ou l'aide internationale, qu'il s'agisse de farines enrichies pour prévenir la malnutrition ou d'aliments complets pour traiter l'urgence.

La raison principale en est le coût de revient trop élevé.

D'autre part, les organismes internationaux (FAO, PAM etc..) ne l'utiliseraient que si des preuves d'efficacité, de qualité et de non toxicité étaient apportées par des scientifiques. L'expertise présente ne permettra pas de les convaincre car trop d'incertitudes demeurent.

Nous considérons que sa place est dans des domaines plus spécifiques tels :

1) le traitement des carences en vitamines A du fait de sa richesse en ß-carotène

2) comme source de micronutriments, lorsqu'il y a des gisements naturels de Spiruline. Ainsi est-elle traditionnellement utilisée de nos jours sous forme de galettes (« dihé ») dans la région du Kanem, (Tchad, Afrique) où elle se développe spontanément.

3) comme source de micronutriments dans les régions où la distribution de farines enrichies ne se fait pas. Cette culture serait une solution quand les terres ne sont pas fertiles comme les anciens marais salants ou les zones semi désertiques. Etant particulièrement attractive elle pourrait sensibiliser les populations à la nécessité d'une bonne nutrition répondant aux besoins quotidiens des jeunes enfants.

Quel avenir pour les fermes de Spiruline en Afrique ?

Le moteur qui a permis le développement de la culture de la Spiruline en Afrique est l'enthousiasme des ONGs. Sous l'impulsion de leurs experts, avec quelques subsides extérieurs, une cinquantaine de fermes existent en 2008, totalisant un peu moins de 2 ha de bassins.

Pour accroître de façon notable le nombre de fermes, il faut trouver d'autres ressources financières et humaines autres que celles des organismes internationaux.

C'est dans le développement de la culture de la Spiruline par les Africains que nous voyons le plus d'avenir. L'analyse des fermes a montré que les Africains s'étaient approprié les techniques et que le niveau des chefs d'exploitation pouvait être élevé. Les problèmes majeurs à l'autonomie financière des fermes sont 1) le prix de revient élevé du kg, souvent supérieur au prix français, 2) le marché local est peu développé, pas encore structuré et le produit peu connu ; ce qui entraîne pour certaines fermes des stocks importants d'invendus 3) la part distribuée à l'humanitaire n'est souvent pas rémunérée.

Les efforts doivent donc porter sur la diminution du coût de revient et la commercialisation : les experts nous affirment pouvoir diminuer par 2 le coût de revient, au travail messieurs.

Compte tenu du niveau des revenus des Africains, il nous parait illusoire de pouvoir commercialiser localement de grandes quantités de Spiruline à un prix élevé. Il serait donc souhaitable que les fermes Africaines puissent exporter une partie de leur production labellisée commerce équitable, de bonne qualité. Ceci permettrait d'éviter les stocks d'invendus, de vendre localement le produit à un prix inférieur à celui de l'exportation et de pouvoir éventuellement financer la part humanitaire.

Potentiel thérapeutique

La Spiruline possède des molécules d'intérêt pharmaceutique (Chapitre 2.2) qui font l'objet de nombreuses publications scientifiques. Ces molécules pourraient dans l'avenir faire partie des traitements de maladies graves. Leur utilisation se fera probablement après extraction pour s'affranchir des risques d'ingestion en trop grande quantité des autres composants de la Spiruline.

7 BIBLIOGRAPHIE

Ayala A, Manetti G, Burgos R, Ayala F (2006) Industrial and semi industrial production of Spirulina, third world potential (modular systems) In Charpy et al. (ed.) International Symposium on Cyanobacteria for Health, Science and Development: 77-81

Balloni W., Tomasselli S., Giovannetti and Margheri M. C. (1980) Biologia fondamentale del genera Spirulina, in Materassi R. (ed) Prospective della coltura di Spirulina in Italia. Consilio Nazionale delle Ricerche, Rome: 49-85

Berger J (2006) Statégies de lutte contre les carences en micronutriments, en particulier en Fer, dans les pays en développement. In Charpy et al. (eds.) International Symposium on Cyanobacteria for Health, Science and Development: 91-100

Borchers AT, Belay A, Keen CL, Gershwin ME (2007) *Spirulina* and Immunity *in* In Gershwin & Belay (ed.) Spirulina in Human Nutrition and Health : 177-193

Borowitzka MA, Borowitzka LJ (1988) Micro-Algal biotechnology. New York: Cambridge University Press 477 pp

Branger B, Cadudal JL, Delobel M, Ouoba H, Yameogo P, Ouedraogo D, Guerin D, Valea A, Zombre C, Ancel P (2003) Spiruline as a food supplement in case of infant malnutrition in Burkina-Faso. Archives de pédiatrie 10: 424-431

Briand JF, Robillot C, Quiblier Lloberas C, Bernard C (2002) A perennial bloom of Planktothrix agardhii (Cyanobacteria) in a shallow eutrophic French lake: limnological and microcystin production studies. Archiv Fur Hydrobiologie 153: 605-622

Briend A. (1998) La malnutrition de l'enfant Institut Danone, rue du Duc 100, Bruxelles

Bruyeron O, Nguyen CK, Berger J, Salvignol B, Monvois C, Trèche S (2006) Alimentation infantile au Vietnam Dix ans d'actions et d'enseignements du programme Fasevie. Coll. Etudes et Travaux Editions du GRET : 175p

Bucaille P (1990) Intérêt et efficacité de l'algue Spiruline dans l'alimentation des enfants présentant une malnutrition protéino-énergétique en milieu tropical. Université Paul Sabatier Toulouse III, Toulouse

Bujard E, Baco U, Mauron J, Mottu F, Nabholtz A, Wuhrmann JJ, Clément G (1970) Composition and nutritive value of blue green algae (*Spirulina*) and their possible use in food formulations. 3rd International Congress of Food Science and Technology

Campanella L, Crescentini G, Avino P (1999) Chemical composition and nutritional evaluation of some natural and commercial food products based on Spirulina. Analusis 27: 533-540

Cases J, Puig M, Caporiccio B, Baroux B, Baccou J-C, Besançon P, Rouanet J-M (1999) Glutathione-related enzymic activities in rats receiving high cholesterol or standard diets supplemented with two forms of selenium. Food Chemistry 65: 207-211

Cases J, Vacchina V, Napolitano A, Caporiccio B, Besancon P, Lobinski R, Rouanet JM. (2001) Selenium from Selenium-Rich Spirulina Is Less Bioavailable than Selenium from Sodium Selenite and Selenomethionine in Selenium-Deficient Rats J. Nutr. 2001 131: 2343-2350

Cases J, Wysocka IA, Caporiccio B, Jouy N, Besancon P, Szpunar J, Rouanet JM. (2002) Assessment of selenium bioavailability from high-selenium spirulina subfractions in selenium deficient Rats J Agric Food Chem.19; 50(13) : 3867-73

Castenholz RW, Rippka R, Herdman M, Wilmotte A (2001) Form-genus I. Arthrospira Stizenberger 1852. Bergey's Manual of Systematic Bacteriology (D. R. Boone & R.W. Castenholz, eds.) 1: 542-543

Challem JJ, Passwater RA, Mindell EM (1981) Spirulina. Keats Publishing, Inc. New Canaan, Connecticut

Chamorro-Cevalos G, Barron BL, Vazquez-Sanchez J (2007) Toxicologic Studies and Antitoxic Properties of Spirulina *in* In Gershwin & Belay (ed.) Spirulina in Human Nutrition and Health : 27-50

Charpy L, Langlade MJ, Vicente N, Riva A (2006) Actes du Colloque international sur Les Cyanobactéries pour la Santé, la Science et le Développement, 3-6 mai 2004, île des Embiez : 192p

Chen T, Zheng W, Wong YS, Yang F, Bai Y. (2006) Accumulation of selenium in mixotrophic culture of Spirulina platensis on glucose. Bioresour Technol. 97 : 2260-2265

Chomérat N, Fayolles S, Cazaubon A (2006) Toxicité non exprimée par la cyanobactérie potentiellement toxique Planktothrix agardhii rencontrée dans un étang saumâtre méditerranéen : prise en compte du risque dans le choix des espèces cultivées a des fins nutritives. In Charpy et al. (ed.) International Symposium on Cyanobacteria for Health, Science and Development: 25-26.

Chopra K, Bishnoi M (2007) Antioxydant Profile of Spirulina : A Blue-Green Microalga in Spirulina In Gershwin & Belay (ed.) Spirulina in Human Nutrition and Health : 101-118

Ciferri O (1983) Spirulina, the edible microorganism. Microbiological Reviews 47: 551-578

Clément G (1975a) Production and characteristic constituents of the algae Spirulina platensis and maxima. Production et constituants caractéristiques des algues Spirulina platensis et maxima Ann. Nutr. Alim. 29 : 477-488

Clément G (1975b) Spirulina, a protein-rich food alga, conférence du Caire avril 1975. institut français du Pétrole, division Applications: 1-18

Clément G, Giddey C, Menzi R (1967) Amino acid composition and nutritive valve of the alga Spirulina maxima. Journal of the Science of Food and Agriculture 18: 497-501

Cogne G., Lehmann B., Dussap CG., Gros JB (2002) Uptake of macrominerals and trace elements by the cyanobacterium Spirulina platensis under photoautotrophic conditions: Culture medium optimization Biotechnology and Bioengineering Volume 81, Issue 5 , Pages 588 - 593

Cohen Z, Reungjitchachawali M, Siangdung W, Tanticharoen M (1993) Production and partial purification of gamma-linolenic acid and some pigments from Spirulina platensis. Journal of Applied Phycology 5: 109-115

Colla LM, Bertolin TE, Costa JAV (2004) Fatty Acids Profile of Spirulina platensis Grown Under Different Temperatures and Nitrogen Concentrations. ZEITSCHRIFT FUR NATURFORSCHUNG C 59: 55-59

Costa JAV, Colla LM, Duarte P, Kabke K, Weber A (2002) Modelling of Spirulina platensis growth in fresh water using response surface methodology. World Journal of Microbiology and Biotechnology 18: 603-607

Cox PA, Banack SA, Murch SJ, Rasmussen U, Tien G, Bidigare RR, Metcalf JS, MorrisonLF, CoddGA and Bergman B. (2005) Diverse taxa of cyanobacteria produce beta-N-methylamino-L-alanine, a neurotoxic amino-acid PNAS 102;5074-5078

Cruz-Aguado R, Winkler D, Shaw CA (2006) Lack of behavioral and neuropathological effects of dietary beta-methylamino-L-alanine (BMAA) in mice. Pharmacol Biochem Behav. 84(2):294-9

Degbey H, Hamadou B, Oumarou H (2006) Evaluation de l'efficacité de la supplémentation en Spiruline du régime habituel des enfants atteints de malnutrition sévère. In Charpy et al. (ed.) International Symposium on Cyanobacteria for Health, Science and Development: 104-108.

Delpeuch F, Joseph A, Cavelier C (1976) Consommation alimentaire et apport nutritionnel des algues bleues (Oscillatoria Platensis) chez quelques populations du Kanem (Tchad). Ann. Nutr. Alim 29 : 497-516

Dupire J. (1998) Objectif: malnutrition. Edition Similia : 224 p

Elyah A (2003) Quel avenir pour la Spiruline? Mem. Biblio. Univ. Montpellier II : 30 p

Falquet J, Hurni JP (2006) Spiruline, Aspects Nutritionnels. Antenna Technologies: 41 p. (http://www.antenna.ch/malnutrition/aspects-nutritionnels.html)

Fedkovic Y, Astre C, Pinguet F, Gerber M, Ychou M, Pujol H (1993) Spirulina and cancer. Bull. Inst. Oceano., Monaco NS 12: 117-120

Fox RD (1999) La Spiruline: Technique, Pratique et Promesse. EDISUD, Aix en Provence (246)

Gantar M, Svircev Z (2008) Microalgae and cyanobacteria: Food for thought [Review]. Journal of Phycology 44:260-268

Geitler L (1932) Cyanophyceae. In : Rabenhorst's Kryptogamenflora von Deutschland, Osterreich und der Schweiz. Kolkwits R. (Eds.) Leipzig Germany : Akademische Verlagsgesellschaft. 14

Gershwin ME, Belay A (2007) Spirulina in Human Nutrition and Health. CRC Press : 312pp

Gibson RS (2005) Zinc : the missing link in combatting micronutrient malnutrition in developing countries. Proc. Nut. Soc. 65: 51-60

Gomez-Coronado DJM, Ibanez E, Ruperez FJ, Barbas C (2004) Tocopherol measurement in edible products of vegetable origin, J. Chromatogr. A 1054 : 227–233

Guiro AT, Sall MG, Kane O, Ndiaye AM, Diarra DeMTA (1987) Effects of rehabilitation with a pearl millet weaning food. Nutrition Reports International (New York USA) 26: 595 - 600

Harrigan GG, Goetz G (2002) Symbiotic and dietary marine microalgae as a source of bioactive molecules-experience from natural products research. Journal of Applied Phycology 14: 103-108

Harrigan GG, Luesch H, Yoshida WY, Moore RE, Nagle DG, Paul VJ (1999) Symplostatin 2: a dolastatin 13 analogue from the marine cyanobacterium *Symploca hydnoides*. J. Nat. Prod. 62: 655-658

Hayakawa Y, Hayashi T, Hayashi K, Hayashi T, Ozawa T, Niiya K, Sakuragawa N (1996) Heparin cofactor II-dependent antithrombin activity of calcium spirulan. Blood Coagulation and Fibrinolysis 7: 554-560

Hayakawa Y, Hayashi T, Lee J-B, Ozawa T, Sakuragawa N (2000) Activation of Heparin Cofactor II by Calcium Spirulan. J. Biol. Chem. 275: 11379-11382

Hayakawa Y, Hirashima Y, Yamamoto H, Kurimoto M, Hayashi T, Lee J-B, Endo S (2003) Mechanism of activation of heparin cofactor II by calcium spirulan. Arch. Biochem. Biophys. 416(1): 47-52

Hayashi K, Hayashi T, Morita N, Kojima I (1993) An extract from Spirulina platensis is a selective inhibitor of herpes simplex virus type 1 penetration into HeLa cells. Phytotherapy Research 7: 76-80

Hayashi T, Hayashi K, Maeda M, Kojima I (1996) Calcium spirulan, an inhibitor of enveloped virus replication, from a blue-green alga Spirulina platensis. Journal of Natural Products 59: 83-87

Henrikson R (1994) Microalga Spirulina, superalimento del futuro. Barcelona:Ediciones S. A. Urano ISBN 84-7953-047-2

Hudson BJF, Karis IG (1974) The lipids of the alga Spirulina. J. Sci. Food Agric 25: 759-763

Jacquet J (1974) Utilisations biologiques des Spirulines . Bull. Acad. Vét. XLVII

Jaki B, Orjala J, Sticher O (1999) A novel extracellular diterpenoid with antibacterial activity from the cyanobacterium *Nostoc commune*. J. Nat. Prod. 62: 502-503

James R, Sampath K, Thangarathinam R, Vasudevan I (2006) Effect of dietary spirulina level on growth, fertility, coloration and leucocyte count in red swordtail, Xiphophorus helleri. Israeli Journal Of Aquaculture Bamidgeh 58: 97-104

Jaouen P, Lépine B, Rossignol N, Royer R, Quéméneur F (1999) Clarification and concentration with membrane technology of a phycocyanin solution extracted from Spirulina platensis. Biotechnology Techniques 13 (12) : 877-881(5)

Jochimsen EM, Carmichael WW, An J, Cardo D, Cookson ST, Holmes CEM, Antunes MBC, Melo Filho DA, Lyra TM, Barreto V, Azevedo SMFO, Jarvis WR (1998) Liver failure and death following exposure to microcystin toxins at a hemodialysis center in Brazil. The New England Journal of Medicine 36: 373-378

Johnson PE, Shubert LE (1986) Availability of iron to rats from Spirulina, a blue-green alga. Nutrition Research 6: 85-94

Jourdan JP (2006) Cultivez votre Spiruline. Edt. Antenna Technologie : 146p http://www.antenna.ch/documents/manuelJourdan2061.pdf

Kiet PQ, Durand-Chastel H (2006) Spirulina rich in AIDS-Antiviral Sulfolipids. In Charpy et al. (ed.) International Symposium on Cyanobacteria for Health, Science and Development: 111-117

Kiet PQ, Dubacq J-P, Demandre C, Mazliak P (1994) Comparative effects of exogenous fatty acid supplementations on the lipids from the cyanobacterium Spirulina platensis. Plant Physiology and Biochemistry 32: 501-509

Kim CJ, Yoon SK, Kim HI, Park YH, Oh HM (2006) Effect of Spirulina platensis and probiotics as feed additives on growth of shrimp Fenneropenaeus chinensis. Journal of Microbiology and Biotechnology 16: 1248-1254

Kohler J, Hoeg S (2000) Phytoplankton selection in a river-lake system during two decades of changing nutrient supply. Hydrobiologia 424: 13-24

Lee JB, Hayashi T, Hayashi K, Sankawa U, Maeda M, Nemoto T, Nakanishi H (1998) Further purification and structural analysis of calcium spirulan from Spirulina platensis. Journal of natural products, Sept : 1101-1104

Lee JB, Srisomporn P, Hayashi K, Tanaka T, Sankawa U, Hayashi T (2001) Effects of structural modification of calcium spirulan, a sulfated polysaccharide from Spirulina platensis, on antiviral activity. Chemical And Pharmaceutical Bulletin. Jan 49: 108-110

Li B, Gao MH, Zhang XC, Chu XM (2006) Molecular immune mechanism of C-phycocyanin from Spirulina platensis induces apoptosis in HeLa cells in vitro. Biotechnology And Applied Biochemistry 43(3) : 155-164

Lobner D, Piana PMT, Abed K. Salous AK, Peoples RW (2007) β-N-methylamino-l-alanine enhances neurotoxicity through multiple mechanisms. Neurobiology of Disease 25(2): 360-366

Lobner M, Walsted A, Larsen R, Bendtzen K, Nielsen CH (2008) Enhancement of Human Adaptive Immune Responses by Administration of a High-Molecular-Weight Polysaccharide Extract from the Cyanobacterium Arthrospira platensis Journal of Medicinal Food 11(2): 313-322

Lutter CK, Dewey KG (2003) Proposed Nutrient Composition for Fortified Complementary Foods. Suppl.. J Nutr 133 : 3011S-3020S

Mazo VK (2004) Microalgae spirulina in human nutrition. Vopr Pitan 73:45-53.

Muhling M, Harris N, Belay A, Whitton BA (2003) Reversal of helix orientation in the cyanobacterium Arthrospira. Journal of Phycology 39: 360-367

Mundt S, Kreitlow S, Nowotny A, Effmert U (2001) Biochemical and pharmacological investigations of selected cyanobacteria. International Journal of Hygiene and Environmental Health 203: 327-334

Parikh P, Mani U, Iyer U (2001) Role of Spirulina in the control of glycemia and lipidemia in type 2 diabetes mellitus. Journal of Medicinal Food 4: 193-199

Pascaud M, Doumenge F, Durand-Chastel H, Toulemont A (1993) The essential polyunsaturated fatty acids of Spirulina and our immune response. Bull. Inst. océanogr. NS12: 49-57

Pierlovisi C (2007) L'Homme et la Spiruline: Un avenir commun? Composition chimique, intérêts alimentaires et activités biologiques. Paris V- René Descartes, Faculté des Sciences Pharmaceutiques et Biologiques, Paris (162)

Planes P, Rouanet J-M, Laurent C, Baccou J-C, Besancon P, Caporiccio B (2002) Magnesium bioavailability from magnesium-fortified spirulina in cultured human intestinal Caco-2 cells Food Chemistry 77(2) : 213-218(6)

Prati M, Moltenib M, Pomatia F, Rossetti C, Bernardinia G (2001) Biological effect of the *Planktothrix sp*. FP1 cyanobacterial extract. Toxicon 40(3) : 267-272

Pugh N, Ross SA, ElSohly HN, ElSohly MA, Pasco DS (2001) Isolation of three high molecular weight polysaccharide preparations with potent immunostimulatory activity from *Spirulina platensis*, Aphanizomenon flos-aquae and Chlorella pyrenoidosa. Planta Medica 67: 737-742

Puyfoulhoux G, Rouanet JM, Besancon P, Baroux B, Baccou JC, 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: 1625-1629

Quillet M (1975) Recherches sur les substances glucidiques élaborées par les Spirulines. Ann. Nutr. Alim. 29: 553-561

Qureshi MA, Garlich JD, Kidd MT (1996) Dietary Spirulina platensis enhances humoral and cell-mediated immune functions in chickens. Immunopharmacology and Immunotoxicology 18: 465-476.

Ramamoorthy A, Premakumari S (1996) Effect of supplementation of Spirulina on hypercholesterolemic patients. Journal of Food Science and Technology 33: 124-128

Regunathan C, Wesley SG (2006) Pigment deficiency correction in shrimp broodstock using Spirulina as a carotenoid source. Aquaculture Nutrition 12: 425-432

Remirez D, Gonzalez R, Merino N, Rodriguez S, Ancheta O (2002) Inhibitory effects of Spirulina in zymosan-induced arthritis in mice. Mediators of Inflammation 11: 75-79

Saker ML, Welker M., Vasconcelos VM (2007) Multiplex PCR for the detection of toxigenic cyanobacteria in dietary supplements produced for human consumption Appl. Microbiol. Biotechnol. 73 :1136-1142

Sall MG, Dankoko B, Badiane M, Ehua E, Kuakuwi N (1999) Résultats d'un essais de réhabilitation nutritionnelle avec la Spiruline à Dakar. Médecine d'Afrique Noire 46: 143-146

Sall MG, Kuakuvi N, Mbaye NG, Fall M (1992) Essai d'un aliment de sevrage commercial dans le traitement des malnutritions protéinoénergétiques graves en milieu hospitalier: à propos de 76 cas. Médecine d'Afrique Noire (Méd. Afr. Noire) 39: 451-457

Sall MG, Kuakuwi N, Sow HD, Sanokho A, Senghor G (1989) Etude comparative de trois méthodes thérapeutiques de la MPC de l'enfant en milieu hospitalier : à propos de 402 cas. In "Les Carences Nutritionnelles dans les PVD" Paris, Editions Karthala, ACCT

Samuels R, Mani UV, Iyer UM, Nayak US (2002) Hypocholesterolemic effect of Spirulina in patients with hyperlipidemic nephrotic syndrome. Journal of Medicinal Food 5: 91-96

Santillan C (1974) Cultivation of the Spirulina for Human Consumption and for Animal Feed. International Congress of Food Science and Technology.

Seshadri CV (1993) Large scale nutritional supplementation with spirulina alga. All India Coordinated Project on Spirulina. Shri Amm Murugappa Chettiar Research Center (MCRC) Madras, India.

Seshadri CV, Umesh BV et Manoharan R. (1991) Beta-carotene studies in Spirulina Society of Applied Algology. International conference No5, vol. 38, no 2-3 : 111-113

Shekharam KM, Venkataraman LV, Salimath PV (1987) Carbohydrate Composition and Characterization of Two Unusual Sugars from the Blue Green Alga Spirulina-Platensis. Phytochemistry 26: 2267-2270

Simpore J, Kabore F, Zongo F, Dansou D, Bere A, Pignatelli S, Biondi DM, Ruberto G, Musumeci S (2006) Nutrition rehabilitation of undernourished children utilizing Spiruline and Misola. Nutrition journal [electronic resource]. 5: 3

Simpore J, Pignatelli S Musumeci S (2007) The effects of Spiruline on the immune functions of HIV-infected undernourished children. J Infect Developing Countries 1(2) : 112-117.

Simpore J, Zongo F, Kabore F, Dansou D, Bere A, Nikiema JB, Pignatelli S, Biondi D, Ruberto G, Musumeci S (2005) Nutrition Rehabilitation of HIV-Infected and HIV-Negative Undernourished Children Utilizing Spirulina. Ann Nutr Metab 49 : 373-380

Singh Y, Kumar HD (1994) Adaptation of a strain of Spirulina platensis to grow in cobalt- and iodine-enriched media. J-Appl-Bacteriol. 76(2) : 149-54

Sorto Mahamat (2003) Utilisation et consommation de la Spiruline au Tchad. 2ème Atelier international / 2nd International Workshop Voies alimentaires d'amélioration des situations nutritionnelles Food-based approaches for a healthy nutrition Ouagadougou, 23-28 / 11 / 2003

Spolaore P, Joannis-Cassan C, Duran E, Isambert A (2006) Commercial Applications of Microalgae. Journal of Bioscience and Bioengineering 101: 87-96

Toyomizu M, Sato K, Taroda H, Kato T, Akiba Y (2001) Effects of dietary Spirulina on meat colour in muscle of broiler chickens. British Poultry Science 42: 197-202

Tsarahevitra J (2005) Adaptation de la Spiruline du Sud de Madagascar à la culture en eau de mer. Mise au point de structures de production à l'échelle villageoise. IHSM, Université de Toliara, , Marseille (186)

Tulliez J, Bories G, Boudène C, Février C (1975) Les hydrocarbures des algues Spirulines: nature, étude du devenir de l'heptadécane chez le rat et le porc. Ann. Nutr. Alim. 29: 563-572

Vincenzini M, Ferrari F, Margheri MO, Florenzano G (1980) Quinonoid and tocopherol levels in Spirulina platensis.Microbiologica 3 : 131-136

Von der Weid D (2006) La spiruline, une réponse à la malnutrition en Inde. International Symposium on Cyanobacteria for Health, Science and Development: 109-112.

Vonshak A (1997) *Spirulina platensis (Arthrospira):* physiology Cell biology and biotechnology. Taylor & Francis LTD.

Wang J, Wang Y, Wang ZX, Li L, Qin J, Lai WQ, Fu Y, Suter PM, Russell RM, Grusak MA, Tang GW, Yin SA (2008) Vitamin A equivalence of spirulina beta-carotene in Chinese adults as assessed by using a stable-isotope reference method. American Journal of Clinical Nutrition 87:1730-1737

Watanabe F (2007) Vitamin B12 Sources and Bioavailability. Experimental Biology and Medicine 232:1266-1274

Watanuki H, Ota K, Tassakka ACMAR, Kato T, Sakai M (2006) Immunostimulant effects of dietary Spirulina platensis on carp, Cyprinus carpio. Aquaculture 258: 157-163

Weiss JH, and Choi DW (1988) Beta-N-methylamino-l-alanine neurotoxicity: requirement for bicarbonate as a cofactor. Science 241 : 973–975.

Wu L-c, Ho J-a A (2007) Antixoxydative and Hepatoprotective Effects of Spirulina In Gershwin & Belay (ed.) Spirulina in Human Nutrition and Health : 119-151

Xue CH, Hu YQ, Saito H, Zhang ZH, Li ZJ, Cai YP, Ou CR, Lin H, Imbs AB (2002) Molecular species composition of glycolipids from Sprirulina platensis. Food Chemistry 77: 9-13

Yamamoto C, Fujiwara Y, Kajia T (2006) The biological effects of depolymerized sodium spirulan and sulfated colominic acid on vascular cells are beneficial in preventing atherosclerosis. Journal of Health Science 52: 205-210

Yamamoto C, Nakamura A, Shimada S, Kaji T, Lee JB, Hayashi T (2003) Differential effects of sodium spirulan on the secretion of fibrinolytic proteins from vascular endothelial

cells: Enhancement of plasminogen activator activity. Journal of Health Science 49: 405-409

Yates AA (2001) National nutrition and public health policies: Issues related to bioavailability of nutrients when developing dietary reference intakes. Journal of Nutrition 131: 1331-1334

Zarrouk C (1966) Contribution à l'étude d'une cyanophycée: influence de divers facteurs physiques et chimiques sur la croissance et la photosynthèse de *Spirulina maxima (Setch et Gardner) Geitler* Thèse Doctorat Faculté des Sciences. Université de Paris

Zhang HQ, Lin AP, Sun Y, Deng YM (2001) Chemo- and radio-protective effects of polysaccharide of Spirulina platensis on hemopoietic system of mice and dogs. Acta Pharmacologica Sinica 22 : 1121-1124