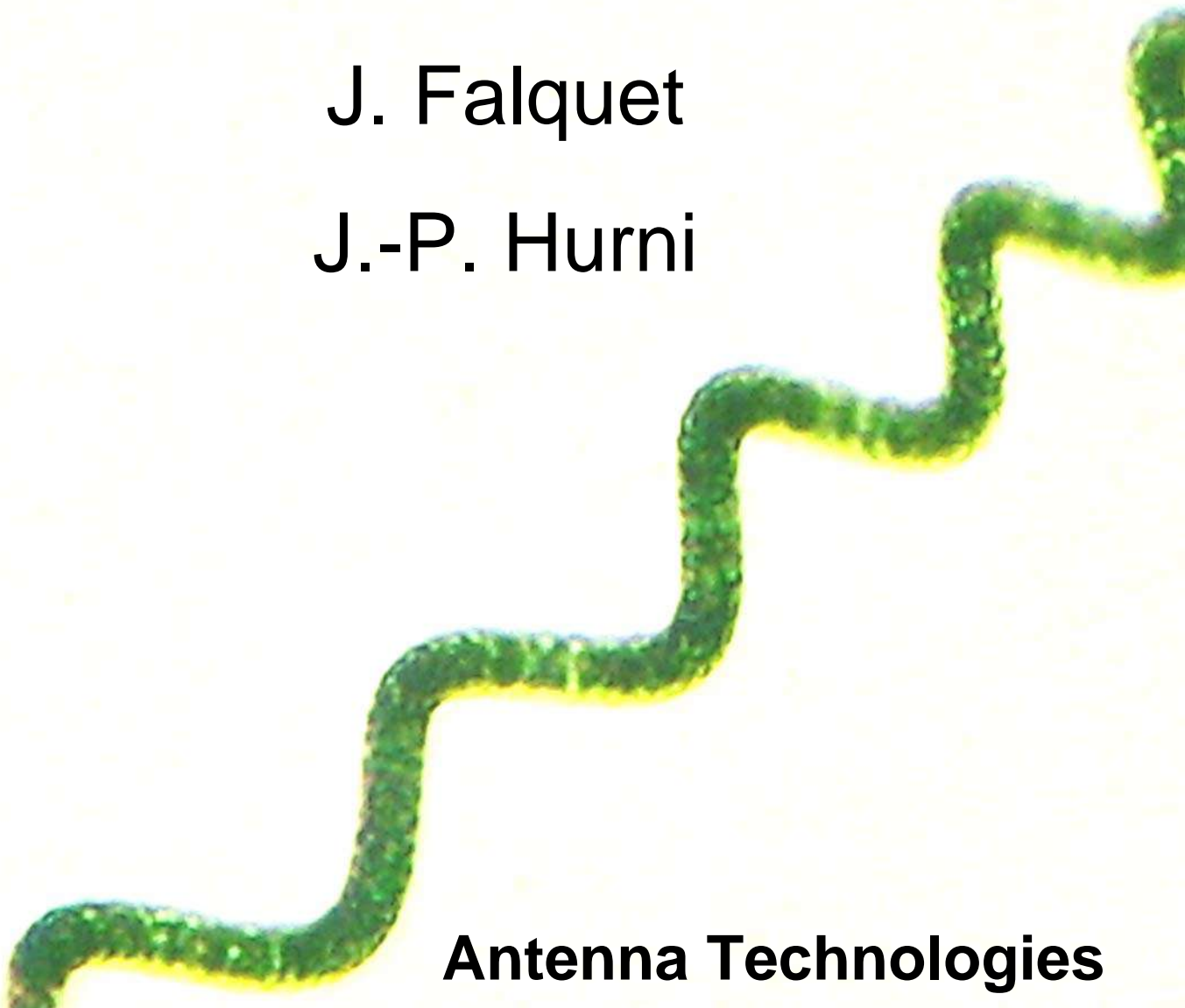


# **Spiruline**

## **Aspects Nutritionnels**

J. Falquet

J.-P. Hurni



**Antenna Technologies**

**Novembre 2006**

## TABLE DES MATIERES

Introduction.....	3
1. Protéines.....	4
1.1. Quantités, composition.....	4
1.2. Utilisation protéique nette (NPU) .....	5
1.3. Efficacité protéique (PER) .....	5
2. Lipides .....	6
2.1. Lipides totaux.....	6
2.2. Acides gras.....	7
2.3. Lipides insaponifiables .....	8
3. Glucides .....	9
4. Acides nucléiques .....	10
5. Vitamines .....	10
5.1. Provitamine A ( $\beta$ -carotène).....	10
5.2. Vitamine E (tocophérols) .....	11
5.3. Vitamines hydrosolubles.....	12
6. Minéraux et oligo-éléments .....	13
6.1. Fer .....	14
6.2. Zinc .....	14
6.3. Magnésium.....	15
6.4. Sélénium .....	15
6.5. Iode .....	16
6.6. Autres minéraux.....	16
7. Microflore associée aux milieux de cultures et aux préparations de spiruline .....	16
8. Etudes toxicologiques .....	17
8.1. Recherche de toxiques minéraux .....	17
8.2. Recherche de toxiques organiques, .....	18
mutagènes, tératogènes .....	18
8.3 .....	19
Cyanotoxines .....	19
8.4 Résidus de pesticide.....	19
8.5 Réactions allergiques .....	19
8.6 Risques de surdoses .....	20
9. Acceptabilité, Formulation et conservation .....	20
9.1 Acceptabilité alimentaire .....	20
9.2 Formulations alimentaires.....	20
9.3 Conservation .....	21
10. Essais nutritionnels chez l'homme .....	23
11. Conclusion .....	25
12. Bibliographie .....	26

## INTRODUCTION

« Il pousse sur les eaux de la lagune de Mexico une espèce de limon très fin. A une certaine période de l'année quand il forme des amas, les Indiens le récoltent avec un filet très fin jusqu'à en remplir leurs embarcations. Sur le rivage ils forment à même le sable des rectangles peu profonds et très lisses de deux ou trois coudées de long et d'un peu moins en largeur. Ils l'étendent afin de le sécher et il en résulte un gâteau d'une épaisseur d'un peu moins de deux doigts; séché quelques jours, celui-ci devient moins épais qu'un ducat. Découpé en larges plaques, les Indiens en consomment de grandes quantités et il se garde si bien qu'ils le vendent sur les marchés de tout le pays. Nous qui apprécions la sauce des Indiens, nous le trouvons très savoureux avec son petit goût salé.»<sup>1</sup>

Les spirulines, cyanobactéries traditionnellement consommées depuis des siècles par certaines populations (Farrar, 1966), et de nos jours encore au Tchad (Léonard, 1966; Delpeuch, 1975; Sorto, 2003) sont l'objet d'une redécouverte depuis quelques années. Autrefois classées parmi les "algues bleues-vertes", elles ne sont pas à proprement parler des algues, même si par commodité on continue à les désigner comme telles. Elles croissent naturellement dans les eaux alcalines de certains lacs, en zones chaudes. D'une taille de l'ordre de 0.1 mm, elles se présentent généralement comme de minuscules filaments verts enroulés en spires plus ou moins serrées et nombreuses, suivant les souches. Dans le Kanem (Tchad), ce sont plusieurs dizaines de tonnes de spiruline qui sont récoltées et consommées annuellement. En 1997, on estimait à environ 100'000 US \$ le revenu généré localement par la vente de ce produit (Abdulqader, 2000) : au vu du niveau économique de la région, il s'agit là d'un impact majeur sur le niveau de vie local, sans parler d'un impact en matière de santé qui reste encore à évaluer.

C'est d'abord l'impressionnante teneur en protéines des spirulines, ainsi que leur vitesse de croissance, dans des milieux totalement minéraux, qui ont attiré l'attention des chercheurs, comme des industriels.

Au cours d'analyses plus approfondies, nombre de points particulièrement intéressants sur le plan nutritionnel sont apparus: composition protéique équilibrée, présence de lipides essentiels rares, de nombreux minéraux et vitamines. (Ciferri, 1983).

Tandis que l'intérêt suscité par d'autres micro-organismes s'estompe quelque peu devant des problèmes comme leur digestibilité ou leur teneur en acides nucléiques, la spiruline semble actuellement l'une des meilleures solutions pour la production simple d'un complément alimentaire de haute qualité. Mentionnons aussi que les conditions extrêmes (salinité et pH) dans lesquelles la spiruline se développe assurent l'hygiène des cultures, car bien peu d'autres micro-organismes sont capables de survivre dans de telles conditions.

Nous espérons par ce travail donner une vision synthétique des propriétés nutritionnelles de la spiruline. Propriétés d'autant plus importantes que la production de ce microorganisme est particulièrement adaptée aux conditions climatiques et économiques des régions où sévit la malnutrition. Relevons à ce propos l'importance des travaux visant à améliorer, à tester et à diffuser des méthodes simples et sûres de production locales de spiruline (Becker, 1993; Fox, 1980; Jourdan, 1996). A l'autre extrême des usages alimentaires de la spiruline, mentionnons les travaux menés tant par la NASA (Karel, 1984) que par l'Agence Spatiale Européenne sur l'usage de la spiruline dans de futures stations spatiales (Desmorieux, 2006).

Note préliminaire : de récents travaux portant sur la biologie moléculaire de la spiruline ont démontré l'extrême homogénéité génétique des diverses « espèces » de spirulines (Nelissen, 1994; Scheldeman, 1999; Manen, 2002), au point que l'on peut remettre en question l'existence même de telles espèces; mieux vaudrait sans doute parler de « variétés » ou d'« écotypes » d'une même espèce dont le nom scientifique est « *Arthrospira platensis* ». Notre travail continuera cependant à utiliser les termes de « *Spirulina platensis* » et de « *Spirulina maxima* » là où il est fait référence à des études mentionnant ces dénominations. Selon notre point de vue, bien des études ont essentiellement établi des comparaisons entre deux provenances d'échantillons de spiruline : les échantillons mexicains étant nommés « S.

<sup>1</sup> Traduction V.Lopez et J. Falquet d'après W. Farrar, 1966

*maxima* » et les échantillons provenant de toute autre partie du monde étant presque toujours nommés « *S. platensis* ». Il est bien établi que les variations de conditions de culture provoquent facilement de forts changements dans la composition biochimique des spirulines. Les différences de teneur en protéine, en lipides, en vitamines ou en minéraux données entre telle et telle « espèces » de spiruline doivent donc être prises avec la plus grande réserve : ces valeurs sont probablement bien plus liées aux conditions de croissance de chaque échantillon qu'à d'hypothétiques spécificités génétiques.

---

## 1. PROTEINES

Remarque préliminaire : pour des raisons historiques, il existe une forte focalisation sur les protéines lorsque l'on parle de spiruline. Cette attitude est bien compréhensible lorsque l'on prend en compte à la fois la richesse et la qualité de ces protéines; il faut pourtant préciser d'emblée que cet intérêt doit être tempéré d'une part à cause du coût relativement élevé de la spiruline et d'autre part parce que les quantités de spiruline ingérables quotidiennement ne peuvent guère dépasser une à deux dizaines de grammes pour un adulte. Ainsi, on ne peut espérer fournir plus d'une quinzaine de grammes de protéines par jour via une consommation raisonnable de spiruline : sans être insignifiante, cette quantité ne représente qu'environ un quart à un tiers des besoins quotidiens en protéines pour une personne de 60 kg, si l'on se base sur les apports quotidiens recommandés actuellement, soit 0.7 à 1 g par kg de poids corporel (Briend, 1998). Notons toutefois que dans le cas de petits enfants souffrant de malnutrition, il ne serait pas irréaliste d'inclure jusqu'à 10 g de spiruline dans la ration quotidienne, ce qui peut représenter, suivant le poids de l'enfant, plus de 50% de l'apport protéique recommandé.

Lors d'une étude de la consommation traditionnelle de spiruline au Tchad, on a estimé que les protéines provenant de la spiruline ne couvraient que 5 à 8% de l'apport protéique requis pour un homme adulte (Delpeuch, 1975; Sorto, 2003). Malheureusement, ces études ne fournissent pas de données utilisables concernant les enfants de cette région.

### 1.1. Quantités, composition

La teneur en protéines de la spiruline oscille entre 50 et 70% de son poids sec. Ces valeurs sont tout à fait exceptionnelles, même parmi les micro-organismes; d'autre part, les meilleures sources de protéines végétales n'arrivent qu'à la moitié de ces teneurs, la farine de soya par exemple ne contenant "que" 35% de protéines brutes. En terme de rendement en protéines, il faut aussi considérer que la totalité de la spiruline est consommable (contre une petite fraction pour les végétaux habituels); l'azote apporté par les engrais est donc bien plus efficacement converti en protéines comestibles pour l'homme.

On relève toutefois une variation du contenu en protéines de 10 à 15% selon le moment de la récolte par rapport à la photopériode, les valeurs les plus fortes étant obtenues au début de la période lumineuse (Van Rijn, 1986; AFAA, 1982).

D'un point de vue qualitatif, les protéines de la spiruline sont complètes, car tous les acides aminés essentiels y figurent, ils représentent 47% du poids total des protéines (Bujard, 1970). Parmi ces acides aminés essentiels, les plus faiblement représentés sont les acides aminés soufrés: méthionine et cystéine (AFAA, 1982; Bujard, 1970; Clément, 1967), qui sont toutefois présents à plus de 80% de la valeur idéale définie par la FAO (sur la base de l'albumine d'oeuf et de la caséine). Il semble aussi qu'une des méthodes de séchage utilisée dans l'industrie, le séchage sur tambours chauffants, réduise la teneur en méthionine d'environ 30% par rapport au séchage par pulvérisation (Vermorel, 1975). La lysine serait aussi légèrement sous représentée d'après certains auteurs (PAG, 1974), suffisante d'après d'autres (Clément, 1967).

Ce spectre d'acides aminés montre que la valeur biologique des protéines de la spiruline est très haute, et que l'optimum pourrait être atteint par complémentation avec une bonne source d'acides aminés soufrés et éventuellement de lysine et/ou d'histidine: des céréales comme le riz, le blé et le millet par exemple, ou certains oléagineux comme le sésame devraient être d'excellents compléments. Remarquons que les populations du Tchad qui consomment de la spiruline, l'associent au mil qui est spécialement riche en méthionine et cystéine (Léonard, 1967).

A noter que les protéines majeures de la spiruline sont les phycocyanines (des composants de l'appareil photosynthétique des cyanobactéries). Naturellement colorées d'un bleu

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

## **1.2. Utilisation protéique nette (NPU)**

L'utilisation des protéines ingérées est déterminée par la digestibilité, c'est-à-dire la proportion d'azote protéique absorbée, ainsi que par la composition en acides aminés (plus d'autres facteurs dépendant de l'animal ou de l'individu concerné: âge, sexe, état physiologique...). La valeur de NPU est déterminée expérimentalement en calculant le pourcentage d'azote retenu lorsque la source de protéines étudiée est le seul facteur nutritionnel limitant. On étudie généralement cette valeur dans différentes situations: croissance active, état adulte, convalescence (WHO, 1973).

Contrairement à d'autres micro-organismes proposés comme sources de protéines (levures, chlorelles, ...) la spiruline ne contient pas de parois cellulosiques mais une enveloppe de muréine relativement fragile (AFAA, 1982; Bujard, 1970; Challem, 1981; Furst, 1978). Ce fait explique la très bonne digestibilité des protéines de la spiruline simplement séchée: de 83 à 90% (caséine pure 95.1%) (Dillon, 1993; Santillan, 1974).

Ainsi la spiruline ne nécessite ni cuisson ni traitements spéciaux destinés à rendre ses protéines accessibles. C'est un avantage considérable tant du point de vue simplicité de production que pour la préservation de constituants de hautes valeurs tels que vitamines et acides gras polyinsaturés (voir plus loin). Relevons aussi que l'absence de besoin de cuisson est un atout supplémentaire dans les régions où le bois de feu reste la principale (ou la seule) source d'énergie utilisée à cet effet.

La valeur NPU de la spiruline est estimée entre 53 et 61% soit 85 à 92% de celle de la caséine (Ciferri, 1983; Ciferri, 1985; Santillan, 1974).

## **1.3. Efficacité protéique (PER)**

Il s'agit du gain de poids de l'animal ou de l'individu, divisé par le poids de protéines ingérées. Ces mesures sont en général effectuées sur le rat en croissance. Les protéines de référence sont la lactalbumine ou la caséine (WHO, 1973).

La valeur PER de la spiruline, déterminée chez le rat en croissance est estimée, suivant les auteurs, entre 1.80 et 2.6 (Furst, 1978; Santillan, 1974; Sautier, 1975), la valeur PER de la caséine étant de 2.5.

La vitesse de croissance de rats recevant des spirulines comme seule source de protéines est supérieure ou égale à celle des rats témoins. De plus après supplémentation en acides aminés essentiels, les rats recevant des spirulines ont fixé, pour une même quantité d'énergie métabolisable, des quantités de protéines égales ou plus importantes que les rats témoins. Ces résultats indiquent une bonne utilisation métabolique des acides aminés des spirulines, ce qui est encore confirmé par les teneurs en acides aminés libres trouvées dans le sang et les muscles des animaux testés (Vermorel, 1975)

L'effet de la complémentation des céréales par de la spiruline a été évalué avec les résultats suivants chez le rat (Anusuya, 1983) :

<b>Diète</b>	<b>Rapport d'efficacité protéique</b>
Spiruline	1.90
Maïs	1.23
Riz	2.20
Blé	1.15
Riz + spiruline (3:1)	2.35
Riz + spiruline (1:1)	2.40
Blé + spiruline (3:1)	1.42
Blé + spiruline (1:1)	1.90
Maïs + spiruline (3:1)	1.80
Maïs + spiruline (1:1)	1.72
Maïs + avoine + spiruline (3:2:5)	1.90
Maïs + Riz + spiruline (2:2:1)	1.95

**Tableau 1** : rapports d'efficacité protéique comparés, intérêt des complémentations.

Chez l'homme, bien que rares, les études effectuées tendent à montrer des résultats similaires à ceux obtenus sur les animaux, quoique la digestibilité semble un peu plus faible (Proteus, 1975; Sautier, 1975; Vermorel, 1975).

Plusieurs études se sont penchées sur l'extraction et la purification des protéines de la spiruline (Al'bitskaia, 1979 ; Arai, 1976; Chronakis, 2001). Il s'agissait, la plupart du temps, d'augmenter l'acceptabilité supposée de ces protéines, en les débarrassant des matières colorantes et/ou odorantes qui les accompagnent dans la spiruline. Bien que techniquement faisables, ces démarches restent d'un intérêt fort limité parce qu'elles renchérissent encore le prix déjà élevé de la protéine de spiruline. Elles s'apparentent aux études menées sur l'élimination des composés odorants de la spiruline (Qiuhui, 1999) qui nous semblent peu intéressantes vu la complexité technique à mettre en œuvre.

La spiruline est récemment devenue un véritable outil pour l'étude du métabolisme des protéines et des acides aminés : il est en effet facile de marquer uniformément les protéines de la spiruline en faisant croître ce micro-organisme dans un milieu de culture contenant de l'azote-15 (<sup>15</sup>N, un isotope lourd mais non-radioactif de l'azote). Marqué de cette façon, il est ensuite aisé de suivre le devenir de ces protéines et de leurs acides aminés constitutifs lors de leur digestion puis de leur métabolisation par des animaux ou des humains.

## **2. LIPIDES**

### **2.1. Lipides totaux**

Bien que plusieurs publications (Bujard, 1970; Challem, 1981; Eartrise, 1986; Santillan, 1974) ont donné une valeur de 5.6 à 7% du poids sec en lipides totaux, de meilleurs systèmes d'extraction permettent d'obtenir des valeurs situées entre 6 et 13% (Hudson, 1974; Cohen, 1997; Xue, 2002).

Ces lipides totaux peuvent être séparés en une fraction saponifiable (83%) et une fraction insaponifiable (17%), contenant essentiellement des paraffines, des pigments, des alcools terpéniques et des stérols (Bujard, 1970; Clément, 1975; Santillan, 1974).

La fraction saponifiable est surtout composée de monogalactosyl diglycérides et de digalactosyl diglycérides, 23%, de sulfoquinovosyl diglycéride, 5%, et de phosphatidyl glycérol, 25.9% (Xue, 2002). On ne trouve ni phosphatidyl choline, ni phosphatidyl éthanolamine, ni phosphatidyl inositol en quantités appréciables. Les triglycérides sont rares 0.3%. On détecte en outre 4.6% de phospholipides indéfinis.

## 2.2. Acides gras

On considère que chez l'homme, les besoins en acides gras essentiels sont de 1 ou 2% des calories alimentaires pour l'adulte et de 3% pour les enfants (Man.Merck, 1994; Pascaud, 1991). Il est maintenant bien établi que l'apport de lipides essentiels influe (entre autres) sur le système immunitaire tant humoral que cellulaire (Hwang, 1989). On range actuellement les acides gras essentiels en deux groupes (oméga-3 et oméga-6) caractérisés par la position de l'insaturation la plus proche du groupe méthyl terminal. Comme les acides oméga-3 et oméga-6 sont convertis chez l'homme en dérivés biochimiques distincts qui semblent avoir des effets antagonistes, certains spécialistes recommandent actuellement un rapport oméga-6/oméga-3 situé entre 4 et 5 (Pascaud, 1993). Pour une analyse détaillée des acides gras de la spiruline, on se rapportera à Hudson et Karis (Hudson, 1974); les glycolipides de la spiruline ont aussi été étudiés en détail (Xue, 2002). L'extraction par le gaz carbonique super-critique des lipides de la spiruline, et particulièrement de l'acide linoléique semble la méthode de choix pour une extraction quantitative (Mendes, 2005).

<b>Profil typique des acides gras de la spiruline (<i>Arthrospira sp</i>)</b>	
<b>Acides gras</b>	<b>% des acides gras totaux</b>
palmitique (16:0)	25-60%
palmitoléique (16:1) oméga-6	0.5-10%
stéarique (18:0)	0.5-2%
oléique (18:1) oméga-6	5-16%
linoléique (18:2) oméga-6	10-30%
gamma-linolénique (18:3) oméga-6	8-40%
alpha-linolénique (18:3) oméga-3	absent

**Tableau 2:** principaux acides gras de la spiruline. Voir aussi plus haut « note préliminaire »

Les premières publications mentionnant la présence d'acide gamma-linolénique (GLA) dans la spiruline indiquaient que celui-ci ne représentait que 10 à 20% des acides gras de *S. maxima*, c'est-à-dire 1 - 2% du sec (23-32-49), alors qu'on en trouvait jusqu'à 40% chez *S. platensis*, soit environ 4% du poids sec de spiruline. Cette distinction doit maintenant être prise avec précaution (voir note préliminaire). Les mesures effectuées par Antenna Technologies en utilisant une technique

d'estérification<sup>2</sup> préservant les acides gras fortement insaturés ont montré d'importantes variations en GLA pour trois échantillons : 18% des acides gras totaux pour un échantillon provenant du Costa-Rica, 28% pour un échantillon cultivé en France et 32% pour un échantillon provenant d'Equateur (J. Falquet, 2003 résultats non-publiés). Malgré ces variations, la spiruline peut être considérée comme l'une des meilleures sources connues d'acide gamma-linolénique, après le lait humain et quelques huiles végétales peu courantes et fort chères (huiles d'onagre, de bourrache, de pépin de cassis et de chanvre) (Ciferri, 1983).

La présence d'acide gamma-linolénique, 18:3oméga-6 (Otlés, 2001) est à souligner du fait de sa rareté dans les aliments courants et de sa haute valeur alimentaire présumée. Normalement synthétisé chez l'homme (à partir de l'acide linoléique, 18:2oméga-6, d'origine végétale) l'acide gamma-linolénique peut néanmoins être directement assimilé avec profit en cas de trouble ou d'insuffisance de sa synthèse endogène (Man. Merck, 1994). L'importance de ces acides gras tient à leurs devenir biochimiques: ce sont les précurseurs des prostaglandines, des leukotriènes et des thromboxanes qui sont autant de médiateurs chimiques des réactions inflammatoires et immunitaires.

D'autres acides gras essentiels sont également présents, comme l'acide linoléique (18:2)oméga-6. Notons aussi une assez forte proportion d'acide palmitique, 16:0, de 25 à 60% selon les publications, ce qui probablement reflète encore une fois la variabilité entre échantillons.

Quant aux sulfolipides tels que les sulfoquinosyl-diglycérides (5% de la fraction saponifiable), ils suscitent actuellement de nouvelles recherches sur leurs propriétés thérapeutiques (Quasney, 2001) depuis qu'une activité protectrice contre l'infection des cellules helper-T par le VIH leur a été attribuée (Gustafson, 1989).

A noter encore l'absence d'acides gras au nombre de carbone impair (Clément, 1975) et une très faible teneur en acides gras à chaînes ramifiées (Bujard, 1970), deux types de lipides non métabolisables par les animaux supérieurs. Enfin, la spiruline a été recommandée comme supplément alimentaire en cas de carence en acides gras essentiels (Hudson, 1974).

Il semble bien établi que le contenu en acide gras de la spiruline puisse être facilement modifié suivant les conditions de culture (Colla, 2004). De plus, l'ajout de certains acides gras directement dans le milieu de culture de la spiruline peut largement modifier la composition lipidique de celle-ci; ainsi en ajoutant des sels d'acide linoléique (C18 :2), on peut considérablement modifier la teneur en acide gamma-linolénique ainsi qu'en sulfolipides de la spiruline (Quoc, 1994; Durand-Chastel, 1999). Enfin, d'importantes variations dans le profil des acides gras ont été étudiées entre différentes souches de spiruline (*Arthrospira sp*) et l'absence d'acide alpha-linolénique a été bien établie. Ce dernier acide gras peut même être considéré comme un facteur de discrimination entre le genre *Arthrospira* (qui n'en contient pas) et le genre *Spirulina*, qui en contient toujours (Mühling, 2005).

## 2.3. Lipides insaponifiables

### 2.3.1. Stérols

Bien que certains travaux (Bujard, 1970) soulignent l'absence de stérols, il semble que ces produits représentent 1.5% de la fraction non polaire des lipides de *S. Maxima*. Aucune publication ne dépasse toutefois la valeur de 0.015% du poids sec de la spiruline en stérols libres (Clément, 1975; Hudson, 1974; -Santillan, 1974). Les stérols identifiés sont surtout le clionastérol, l'avenasterol et, en plus faible quantité, le cholestérol (Paoletti, 1981). On trouverait aussi du beta-sitosterol (Martinez-Nadal, 1971; Santillan, 1982).. Certains de ces stérols pourraient être en rapport avec l'activité antimicrobienne des spirulines (Clément, 1975).

### 2.3.2. Terpènes

Les alcools terpéniques représentent 5 à 10% de l'insaponifiable, il s'agit essentiellement d'alpha- et de bêta-amyrine, un triterpène pentacyclique. *S. Maxima* contiendrait aussi un alcool triterpénique saturé non identifié (Clément, 1975), mais aucune étude ultérieure ne vient confirmer cette information.

---

<sup>2</sup> Le GLA étant extrêmement sensible à la dégradation, il peut être facilement sous-estimé en utilisant des méthodes d'estérification à haute température. Nous avons utilisé un réactif spécial (TMSH) permettant d'effectuer cette réaction à froid.



### **2.3.3. Hydrocarbures saturés (paraffines).**

Les hydrocarbures saturés à longues chaînes représentent une fraction importante de l'insaponifiable, 25%, tant chez *S. Platensis* que chez *S. Maxima* (Bujard, 1970). Il y a donc entre 0.1 et 0.3% d'hydrocarbures saturés dans la matière sèche des spirulines.

Les deux tiers de ces hydrocarbures sont constitués de n-heptadécane, le reste comprenant dans l'ordre, les hydrocarbures linéaires saturés en C<sub>15</sub>, C<sub>16</sub>, C<sub>18</sub> ainsi que trois hydrocarbures saturés à chaînes ramifiées, non identifiés (Tulliez, 1975).

La présence de telles paraffines n'est pas exceptionnelle: on en trouve par exemple entre 0.1 et 0.5% dans certaines levures alimentaires. La métabolisation de ces produits, et plus particulièrement de l'heptadécane sera discutée dans la partie concernant les essais toxicologiques.

---

## **3. GLUCIDES.**

Les glucides constituent globalement 15 à 25% de la matière sèche des spirulines (Quillet, 1975). L'essentiel des glucides assimilables est constitué de polymères tels que des glucosannes aminés (1.9% du poids sec) et des rhamnosannes aminés (9.7%) ou encore de glycogène (0.5%).

Les glucides simples ne sont présents qu'en très faibles quantités. Ce sont le glucose, le fructose et le saccharose; on trouve aussi des polyols comme le glycérol, le mannitol et le sorbitol.

Les parois cellulaires des spirulines s'apparentent à celles des bactéries Gram-positives puisqu'elles sont formées de glucosamines et d'acide muramique associés à des peptides. Bien que non digestibles, ces parois sont relativement fragiles et rendent le contenu cellulaire très accessible aux enzymes de digestion: c'est là un avantage important par rapport aux organismes pourvus de parois celluloses (levures, chlorelles...).

Du point de vue nutritionnel, la seule substance glucidique intéressante par sa quantité chez la spiruline est le méso-inositol phosphate qui constitue une excellente source de phosphore organique ainsi que d'inositol (350-850 mg/kg mat. sèche) (Challem, 1981; Nippon-Ink, 1977). Cette teneur en inositol est environ huit fois celle de la viande de boeuf et plusieurs centaines de fois celle des végétaux qui en sont les plus riches.

Il faut toutefois remarquer qu'une teneur si élevée en cyclitols phosphates pourrait avoir à la longue un effet décalcifiant, si l'apport en calcium se trouvait insuffisant. Heureusement, dans le cas de la spiruline, ce danger est écarté par sa richesse en calcium, comparable à celle du lait (Challem, 1981; Earhrise, 1986) (voir "oligo-éléments"). Notons que les polysaccharides de la spiruline auraient des effets de stimulation des mécanismes de réparation de l'ADN (Pang, 1988) ce qui pourrait expliquer un effet radioprotecteur plusieurs fois mentionné à propos de la spiruline (Qishen, 1989). D'autres explications ont été avancées pour expliquer cet effet, notamment la neutralisation des radicaux libres générés par l'irradiation. Cette neutralisation rapide serait due prioritairement au beta-carotène, mais peut-être également à la phycocyanine. D'autre part, les métallo-thionéines abondantes dans la spiruline pourraient être impliquées dans l'excrétion accélérée de certains radioisotopes tel qu'il a été observé lors d'une étude nutritionnelle portant sur un groupe d'enfants de Biélorussie gravement contaminés par les suites de la catastrophe de Tchernobyl (Loseva, 1993). Ces polysaccharides auraient également des propriétés immunostimulantes et immunorégulatrices (Baojiang, 1994; Evets, 1994; Zhang, 1994).

Un polysaccharide spécifique de la spiruline, le spirulan, a été isolé et partiellement caractérisé (Lee, 1998; Lee, 2000). Porteur de nombreux résidus sulfate et contenant de l'acide uronique, il est fortement polyanionique; son squelette consiste essentiellement en méthyl-rhamnose et méthyl-xylose. Cette substance semble prometteuse comme anti-viral dans certaines applications thérapeutiques (Hayashi, 1996; Rechter, 2006).

### **Polyhydroxybutyrates (PHB)**

Le PHB est un polymère de réserve accumulé par de nombreuses bactéries; c'est un peu l'homologue de l'amidon chez les plantes et du glycogène chez les animaux. Non-métabolisable par l'homme, il ne semble présenter aucune toxicité. Certaines publications font état de teneurs en PHB

voisines de 6% du poids sec de la spiruline (Campbell, 1982), mais il semble que ces teneurs venaient d'un milieu de culture particulier (contenant de l'acétate), alors que les spirulines provenant de milieux entièrement minéraux ne contiendraient pas plus de 0.3% de PHB (Vincenzini, 1990).

## 4. ACIDES NUCLEIQUES

La teneur en acides nucléiques (ADN et ARN) est un point nutritionnel important car la dégradation biochimique d'une partie de leurs composants (les purines: adénine et guanine) produit en dernier lieu de l'acide urique. Or une élévation du taux d'acide urique plasmatique peut produire à la longue des calculs rénaux et des crises de goutte. On admet généralement que la dose maximum admissible à long terme d'acide nucléique se situe aux alentours de quatre grammes par jour, pour un adulte (Boudène, 1975). Il faut ajouter que l'ARN produit deux fois plus d'acide urique que l'ADN, pour une même teneur en purines et que l'élévation du taux d'acide urique dépend aussi de multiples facteurs, tels que l'âge, le sexe ou encore l'obésité...

Chez *S. Platensis* comme chez *S. Maxima*, on rapporte des valeurs de 4.2 à 6% d'acides nucléiques totaux dans la matière sèche (Santillan, 1974; AFAA, 1982). La proportion d'ADN serait d'un quart à un tiers par rapport à l'ARN (15). Ces chiffres sont à mettre en rapport avec d'autres aliments (tableau 3). La teneur en acides nucléiques des spirulines est très inférieure à celle de la généralité des unicellulaires.

Aliments	Acides nucléiques totaux (% mat. sèche)
Viande de boeuf	1.5
Foie de boeuf	2.2
Spiruline	4-6
Levure	23

**Tableau 3** : teneur en acides nucléiques de quelques aliments

En se basant sur une valeur moyenne de 5% en acides nucléiques, la limite quotidienne de 4 grammes d'acides nucléiques représente le contenu de 80 grammes de spiruline sèche. Cette quantité équivaut à environ huit fois la dose de spiruline recommandée comme supplément alimentaire. On peut donc raisonnablement penser que la teneur en acides nucléiques de la spiruline ne pose pas de problèmes, même à long terme et pour des doses élevées.

---

## 5. VITAMINES

### 5.1. Provitamine A ( $\beta$ -carotène)

Le  $\beta$ -carotène représente 40 à 80% des caroténoïdes présents dans la spiruline, le reste étant composé principalement (par ordre décroissant) de xanthophylle, de cryptoxanthine, d'échinénone, de zéaxanthine et de lutéine (Palla, 1969). On trouve entre 700 et 2000 mg de beta-carotène et environ 100 à 600 mg de cryptoxanthine par kilo de spiruline sèche (Careri, 2001), ces deux caroténoïdes sont convertibles en vitamine A par les mammifères. Les besoins en vitamine A sont estimés chez l'adulte à moins d'un mg par jour (Everts, 1994); d'autre part, la conversion du  $\beta$ -carotène en vitamine A se fait chez

l'humain dans une proportion d'environ 17 à 20% seulement, proportion qui peut aussi varier selon la dose de b-carotène absorbée (Tang, 2000) et, sans doute, selon l'état physiologique de la personne. Quelques grammes de spiruline suffisent donc à couvrir entièrement les besoins en vitamine A d'un adulte. D'autre part, l'absence de rétinol (vitamine A libre) exclut un éventuel risque de surdosage, le b-carotène n'étant pas toxique par accumulation au contraire de la vitamine A. Il faut souligner que chez la femme enceinte, la surdose en vitamine A peut entraîner des malformations du fœtus : ce risque est si réel que l'OMS a édicté une série de recommandations en vue de sécuriser l'apport de vitamine A aux femmes en âge de procréer (WHO, 1998). Étrangement, ce document ne mentionne nulle part l'apport de caroténoïdes (comme ceux de la spiruline) comme alternative sans danger à la délicate supplémentation en vitamine A.

Les valeurs en beta-carotène données plus haut pour la spiruline ont été relevées dans des échantillons de spiruline séchée par pulvérisation, donc sans chauffage; dans le cas du séchage sur tambours chauffants, ces valeurs seraient à diminuer de près d'un tiers (Bujard, 1970). Les caroténoïdes étant très sensibles à l'oxydation, il est impératif de tenir compte des procédés de séchage utilisés pour l'obtention des échantillons de spiruline sur lesquels des mesures ont été effectuées. Suivant le type de séchage, mais aussi suivant la granulométrie du produit final, de fortes différences de préservation immédiate, ainsi que de conservation à long terme ont été mesurées pour le beta-carotène (Seshadri, 1991). Du point de vue du carotène, la meilleure méthode de séchage serait la lyophilisation (malheureusement très chère), suivie du séchage en couche mince à température inférieure à 60°C; pour la conservation à long terme, la spiruline en flocons ou en semoule grossière serait supérieure à la spiruline en poudre.

La biodisponibilité des caroténoïdes de la spiruline a été démontrée aussi bien chez le rat que chez le poulet (Kapoor, 1993; Mitchell, 1990; Ross, 1990). Cette biodisponibilité a aussi été démontrée chez l'homme (Gireesh, 2004). Des études cliniques ont également prouvé l'excellente utilisation des caroténoïdes de la spiruline chez l'humain (Annapurna, 1991). De plus, une étude portant sur 5'000 enfants indiens d'âge pré-scolaire a montré la surprenante efficacité d'une dose quotidienne unique d'un gramme de spiruline sur la déficience chronique en vitamine A. Après 5 mois, la proportion d'enfants gravement déficients en vitamine A, c'est-à-dire présentant le symptôme de la "tache de Bitot" sur la conjonctive de l'oeil, est passée de 80% à 10%. (Seshadri, 1993). Cette étude semble bien démontrer que de très faibles doses de spiruline suffisent déjà à réduire considérablement les risques de cécité et d'atteintes neurologiques consécutives à la déficience en vitamine A chez l'enfant.

Une étude en cours, soutenue par la fondation Nestlé, vise à déterminer précisément le devenir des caroténoïdes de la spiruline consommée par l'homme. Cette étude fait appel à de la spiruline cultivée dans de l'eau lourde (D<sub>2</sub>O) afin d'en marquer isotopiquement les caroténoïdes : il devient ainsi possible de suivre le cheminement métabolique de ces constituants de la spiruline (Tang, 2000; Gireesh, 2001).

Divers travaux sur la supplémentation en vitamine A avaient suggéré une relation entre la carence en cette vitamine et le risque de transmission materno-fœtale du virus HIV (Semba, 1994). Bien que ce sujet reste controversé, une récente méta-analyse du réseau Cochrane conclut qu'il n'y a pas de réelles évidences permettant de croire que l'apport de vitamine A puisse diminuer le risque de transmission du virus du SIDA de la femme enceinte à son enfant (Shey Wiysonge, 2003).

## **5.2. Vitamine E (tocophérols)**

On trouve 50 à 190 mg de vitamine E par kilo de spiruline sèche (Challem, 1981; Earthrise, 1986; Nippon-Ink, 1977), teneur comparable à celle des germes de blé. Une publication plus récente et faisant appel à de meilleures techniques analytiques n'a trouvé que 13 mg/kg de tocophérol (Gomez-Coronado DJ, 2004). Ce travail n'a toutefois pas été effectué sur de la spiruline fraîchement cultivée, mais sur des échantillons commerciaux d'origines indéterminées.

Ces disparités de résultats pourraient provenir de nombreux facteurs dépendant en premier lieu des conditions de culture, mais surtout de séchage de la spiruline. Il est, par exemple, très probable que le séchage par « spray-drying » qui brise très fortement les filaments de spiruline réduise considérablement la durée de conservation des vitamines sensibles à l'oxydation, dont la vitamine E. Les besoins quotidiens en vitamine E seraient de 15 U.I. (Guyton, 1986) soit 12 mg de tocophérols libres. Les propriétés anti-oxydantes du tocophérol pour les acides gras insaturés pourraient expliquer la bonne conservation de ces derniers dans la spiruline séchée.

### 5.3. Vitamines hydrosolubles

Bien que moins riche que la levure en vitamines du groupe B (B12 excepté), la spiruline constitue pourtant une bonne source de ces cofacteurs:

Vitamine	Teneur (mg/kg)	Besoin/jour (adulte) (24-25)
B1	34-50	1.5 mg
B2	30-46	1.8 mg
B6	5-8	2.0 mg
B12	0.10-0.34*	0.003 mg
Niacine	130	20 mg
Folate	0.5	0.4 mg
Panthoténate	4.6 - 25	6 - 10 mg
Biotine	0.05	0.1 - 0.3 mg
C	traces	15 - 30 mg

\* hors pseudo-vitamine B12 (voir plus bas)

#### Vitamine B12

Il faut souligner la teneur exceptionnelle en vitamine B12 (cobalamine) qui est de loin la vitamine la plus difficile à obtenir dans un régime sans viande car aucun végétal courant n'en contient. Déterminée selon l'ancienne méthode standard, la spiruline en serait quatre fois plus riche que le foie cru, longtemps donné comme meilleure source. Il faut pourtant noter qu'il existe une controverse à propos de la biodisponibilité réelle du complexe B12 de la spiruline chez l'homme. Certains tests radiochimiques de liaison au facteur intrinsèque nieraient la présence de vitamine B12 "active" dans la spiruline (Leitzmann, 1993). Ces résultats seraient variables selon les souches de spiruline et cette même méthode d'analyse révélerait de hautes teneurs en B12 "active" dans certaines souches (Hau, 1995). Il semble maintenant que la méthode de choix pour le dosage de la vitamine B12 soit basée sur la chimiluminescence. En utilisant cette méthode, une souche particulière de spiruline (NIES-39) a été soigneusement étudiée en terme de contenu et d'identité des composés de la famille de la vitamine B12, les corrinoïdes (Watanabe, 1999, 2002). Il en résulte que le corrinoïde prédominant (83%) est une pseudo-B12, la 7-adeninyl cyanocobamide, mais que la véritable vitamine B12 représente tout de même 17% des corrinoïdes totaux. Le composé prédominant ne semble pas avoir d'activité B12 chez l'homme, mais il n'interfère pas dans le métabolisme normal de la vitamine B12 (Watanabe, 1999). Il est d'autre part démontré que l'apport de cobalt au milieu de culture provoque, au moins pour la souche testée, une forte accumulation de pseudo-B12, mais n'augmente pratiquement pas la teneur en véritable B12 : on peut donc raisonnablement conseiller la suppression du cobalt dans les formules de milieu de culture pour la spiruline (les traces de ce métal présentes dans les autres ingrédients ou dans l'eau suffisent largement à la synthèse de la véritable B12 de la spiruline). Une note technique de la firme « Cyanotech » mentionne une teneur totale en corrinoïdes de 7 micro-gramme par gramme de spiruline et une fraction de 36% représentant la vitamine B12 assimilable par l'homme (Todd-Lorentz, 1999). Ces valeurs indiquent qu'un gramme de cette spiruline couvrirait plus de 80% des apports quotidiens en B12 pour un adulte. Il serait hautement souhaitable que des recherches spécifiques soient entreprises afin de déterminer si certaines souches de spiruline, ou certaines conditions de culture, permettraient l'obtention d'un meilleur rapport B12/analogues inactifs.

Quoi qu'il en soit de la spiruline, il est maintenant établi que bien d'autres sources alimentaires de vitamine B12 (peut-être toutes !) contiennent elles-aussi de fortes proportions d'analogues non-métabolisables par l'homme (voir par ex. Kondo, 1980 ou Kelly, 2005). Les valeurs de vitamine B12 données pour les denrées alimentaires usuelles devraient donc, elles aussi, faire l'objet d'une révision à la baisse, afin de tenir compte d'une proportion d'analogues sans intérêt nutritionnel. Il semble même que les préparations multivitaminées synthétiques, lorsqu'elles contiennent de la vitamine

B12, renferment aussi des proportions variables d'analogues non-métabolisables, provenant apparemment de réactions entre la « vraie » B12 et d'autres composés comme le fer ou la vitamine C (Herbert, 1982).

La carence en vitamine B12 (anémie pernicieuse) provient soit d'un défaut d'apport alimentaire en cette vitamine (cas de régimes végétaliens stricts) soit d'un défaut d'absorption. Dans ce dernier cas, un supplément de vitamine B12 ne pourra être donné par voie orale : seules des injections permettront d'améliorer durablement l'état du patient. Il semble d'autre part que certains états pathologiques entraînent systématiquement une déficience en vitamine B12, c'est le cas des infections à VIH menant au SIDA (Harriman, 1989; Rule, 1994)

### **Bioptérine**

La spiruline contient une grande quantité de bioptérine (plus précisément l'alpha-glucoside de la bioptérine), qui semble jouer un rôle fondamental dans la protection de l'appareil photosynthétique contre les rayons UV (Noguchi, 1999). Cette substance fortement fluorescente peut, chez l'homme, être convertie en un co-facteur enzymatique d'une très grande importance, la tétrahydrobioptérine. On ne peut considérer cette substance comme une vitamine, car elle peut être entièrement synthétisée chez l'humain; il existe toutefois des situations pathologiques (Hattori, 2002) liées à un manque de synthèse, situation qui peuvent être améliorée par un apport externe de tétrahydrobioptérine. L'efficacité de la bioptérine elle-même, par voie orale, n'est pas connue à ce jour.

## **6. MINÉRAUX ET OLIGO-ELEMENTS**

### **Analyse typique (spiruline sèche): mg/kg**

<b>Minéraux</b>	<b>Teneur de la spiruline(mg/kg)</b>	<b>Doses requises* (mg/jour)</b>
Calcium	1300 - 14000	1200
Phosphore	6700 - 9000	1000
Magnésium	2000 - 4000	250-350
Fer	600 –6000**	18
Zinc	21 – 6000**	15
Cuivre	8 – 2000**	1.5 - 3
Chrome	2.8	0.5 - 2
Manganèse	25 - 37	5
Sodium	4500	500
Potassium	6400 - 15400	3500
Sélénium	0.01-50**	0.05

\* Pour l'adulte (NRC, 1980).

\*\* Valeurs obtenues par enrichissements spécifiques

Les minéraux spécialement intéressants chez la spiruline sont le fer, le zinc, le magnésium, le calcium, le phosphore et le potassium.

## 6.1. Fer

La très haute teneur en fer de la spiruline cultivée (550-6000 mg/kg) est à souligner doublement du fait que les carences en fer sont très répandues (anémies ferriprives), surtout chez les femmes et les enfants et que les bonnes sources alimentaires de fer sont rares. Par comparaison les céréales complètes, classées parmi les meilleures sources de fer, n'en contiennent que 150 à 250 mg/kg; de plus le fer d'origine végétale ne présente qu'une très faible biodisponibilité, seul environ 5% de ce fer est réellement absorbable, à cause de la présence de facteurs anti-nutritionnels (comme les phytates et les tanins) qui empêchent la métabolisation du fer. Quant aux suppléments de fer donnés sous forme de sulfate ferreux, ils peuvent poser des problèmes de toxicité, probablement à cause de leur effet pro-oxydant et sont souvent responsables de diarrhées ou d'autres signes d'intolérance. Dans le cas de la spiruline, la biodisponibilité élevée du fer a été démontrée tant chez le rat (Johnson, 1986; Kapoor, 1993b) que chez l'homme (Puyfoulhoux, 2001). Cette dernière étude démontre que le fer de la spiruline est mieux absorbé que celui de la viande, ce qui est exceptionnel pour un fer non-héminique. Selon les mêmes travaux, le taux de formation de ferritine après digestion de spiruline serait plus de six fois plus élevé que dans le cas d'une même quantité de fer apporté par digestion de viande. Un essai portant sur 26 patients ayant une hémoglobinémie comprise entre 120 et 146 g/l a comparé l'apport de fer sous forme de spiruline ou de sulfate de fer : après quatre semaines de supplémentation par l'équivalent de 10.3 mg de fer par jour, l'hémoglobine du groupe spiruline avait augmenté en moyenne de 5 g/l alors qu'elle n'avait progressé que de 1 g/l chez les patients sous sulfate de fer (Ribadeneira, 2000). Ces résultats pourraient en partie s'expliquer par un effet de la phycocyanine (dont la spiruline est très riche) et pour laquelle certains auteurs invoquent une stimulation de l'érythropoïèse ( Zhang, 1994).

Les spirulines naturelles contiennent rarement plus de 500 mg/kg de fer, quoique des valeurs supérieures à 1000 mg/kg de fer ont été publiées (Campanella, 1999). Dans le cas des spirulines cultivées, l'ajout au milieu de culture de sels de fer, souvent complexés à l'EDTA ou à l'acide citrique, élève facilement ces valeurs entre 600 à 1000 mg/kg, voire bien au delà. On trouve sur le marché européen des spirulines titrant près de 6000 mg/kg en fer<sup>2+</sup> (Biorigin, 2006). Certains brevets récents semblent impliquer la possibilité d'enrichir la spiruline en fer jusqu'à des niveaux extrêmes (supérieurs à 25'000 mg/kg). Il est évident que de tels niveaux de fer placent ces spirulines dans un domaine plus pharmaceutique qu'alimentaire et pourraient poser d'éventuels problèmes de surdose en fer. Relevons que la thématique du fer dans le cadre de la malnutrition infantile est complexe : l'enfant gravement dénutri possède généralement un important stock de fer hépatique qui provient d'une incapacité à éliminer ou à recycler le fer libéré par la fonte musculaire ou l'hémolyse (Briend, 1998). Ce n'est qu'au cours de la reprise de poids qu'un apport en fer est indispensable. L'apport de fer alimentaire est lui aussi complexe, car à la problématique des facteurs anti-nutritionnels qui en limitent la biodisponibilité, il s'ajoute le fait que, chez l'humain, l'absorption du fer ne s'effectue que sur une très courte portion du tube digestif, au niveau du duodénum. Cette absorption dépend aussi de l'état d'oxydation du fer, le fer<sup>2+</sup> étant mieux assimilé que le fer<sup>3+</sup>.

## 6.2. Zinc

Chez les animaux supérieurs, dont l'Homme, le zinc est essentiel au bon fonctionnement du *système immunitaire*, et les personnes souffrant d'une carence importante présentent une susceptibilité accrue à divers agents pathogènes (Shankar, 1998). Des carences en zinc sont fréquemment associées à des diarrhées, à l'anorexie, à des problèmes cutanés, ou à l'infection au VIH (Melchior, 1997). Plusieurs études cliniques ont montré que les supplémentations en zinc pouvaient réduire les diarrhées, les infections respiratoires aiguës, ou encore la sévérité et la mortalité liée au paludisme (Gibson, 2005). Le zinc participe également à la croissance, au développement cognitif et au fonctionnement moteur, notamment chez l'enfant (Black, 2003). Après la vitamine A, le fer et l'iode, le zinc fait maintenant l'objet d'une très forte attention : il s'agit sans doute du quatrième micro-élément majeur dans la lutte contre la malnutrition (Gibson, 2005).

L'absorption du zinc se fait dans l'intestin grêle. Sa biodisponibilité dépend surtout de la composition du repas : tout comme pour le fer, la présence de phytates ou de tanins réduit fortement la proportion de

zinc absorbé (WHO, 2004). Les *protéines animales* sont de bonnes sources en zinc biodisponibles, mais elles sont souvent rares dans les pays en développement.

La spiruline cultivée sans apport intentionnel de zinc au milieu de culture n'en contient généralement que des traces (21-40 microg/g), alors qu'on peut en trouver dans certaines spirulines naturelles près de 400 microg/g (Campanella, 1999). Ces valeurs sont insuffisantes pour que ces spirulines puissent être considérées comme de bonnes sources de zinc, car les apports journaliers recommandés (AJR) sont de 0.6 à 3 mg/j chez un nourrisson/enfant (ces variations dépendent du type de régime alimentaire associé), de 4 à 12 mg/j pour un adolescent et de 3 à 8 mg/j chez l'adulte (WHO, 2004).

La spiruline peut toutefois très facilement être enrichie en zinc (Cogne, 2002). On trouve actuellement sur le marché européen une spiruline titrant 6 mg de zinc par gramme (Biorigin, 2006). Suivant la réelle biodisponibilité de ce zinc, 1 gramme d'une telle spiruline pourrait couvrir l'essentiel des besoins quotidiens en zinc d'un enfant, voire même d'un adulte. La biodisponibilité du zinc de la spiruline n'a pas encore fait l'objet de publications scientifiques, mais on peut raisonnablement s'attendre à de très bons résultats au vu de la biodisponibilité prouvée du fer et du magnésium de la spiruline. Là encore, l'absence de facteurs anti-nutritionnels classiques (phytates, polyphénols, etc.) dans la spiruline, jointe à son excellent pouvoir de chélation réversible des cations laisse supposer une haute biodisponibilité du zinc. Antenna Technologies développe, à l'intention des producteurs de spiruline des pays où sévit la malnutrition, un protocole simple pour enrichir la spiruline en zinc d'une manière fiable et contrôlée. Un test clinique portant sur des enfants carencés en zinc a comparé l'effet du sulfate de zinc à celui d'une spiruline enrichie en zinc. Les résultats de cette étude chinoise semblent indiquer une nette supériorité de la spiruline enrichie en zinc (Yonghuan, 1994).

### 6.3. Magnésium

Les régions aux sols pauvres en magnésium sont courantes et provoquent chez les populations qui les habitent, des syndromes de carences incluant des troubles cardio-vasculaires et nerveux. La carence en magnésium est très fréquente chez les enfants en malnutrition grave, car ceux-ci n'absorbent souvent que des bouillies de céréales qui sont pauvres en magnésium (Briend, 1998). Les bonnes sources de magnésium alimentaire sont les produits animaux, les fruits et les légumes, ainsi que certaines eaux minérales. Les farines complètes sont riches en magnésium, mais celui-ci est peu absorbable du fait de la présence de phytates.

La spiruline peut être considérée comme une excellente source alimentaire de magnésium : elle en est naturellement riche, entre autre par sa teneur en chlorophylle<sup>3</sup>, et ce magnésium a été démontré biodisponible pour l'homme (Planes, 2002). Il faut souligner que la carence en magnésium tend aussi à entraîner une carence en potassium, ce dernier n'étant alors plus absorbé par l'organisme. La spiruline qui est à la fois riche en magnésium et en potassium semble, là encore, parfaitement indiquée dans les formules de renutrition.

### 6.4. Sélénium

Le sélénium est un micro-élément essentiel qui intervient dans la protection contre les espèces oxygénées réactives. Il semble impliqué dans l'élimination des acides gras peroxydés et, en association avec la vitamine E, dans la destruction des radicaux libres. Les doses quotidiennes recommandées pour l'adulte sont de 50 ug (micro-grammes) mais on considère généralement que la limite supérieure de sécurité se situe vers 400 micro-grammes. Une toxicité chronique (sélénose) apparaît systématiquement vers 5000 micro-grammes/jour. Plusieurs études démontrent la possibilité d'enrichir la spiruline en sélénium, par addition de sélénite de sodium au milieu de culture (Chen T, 2005; Li, 2003). Des essais de supplémentation menés sur des rats artificiellement carencés en sélénium ont abouti à la conclusion que la spiruline enrichie en cet élément était une excellente source de sélénium (Cases, 1999). La biodisponibilité du sélénium de la spiruline est élevée, quoique moindre que celle du sélénite de sodium (Cases 2001). Il est toutefois possible d'extraire de la spiruline enrichie en sélénium une fraction présentant une bioassimilabilité égale ou supérieure à celle du sélénite de sodium (Cases, 2002).

---

<sup>3</sup> La molécule de chlorophylle contient un atome de magnésium en son centre.

## 6.5. Iode

La carence en iode provoque chez l'enfant de graves et irréversibles troubles du développement. Le risque de carence en iode concerne environ un milliard (!) de personnes sur notre planète; c'est la première cause de maladie mentale évitable (Hetzel, 1997). Les apports quotidiens recommandés en iode sont de 50 micro-grammes pour les enfants de moins d'un an, environ 100 micro-grammes entre 1 et 10 ans, puis environ 130 micro-grammes. Ces apports recommandés s'élèvent à 175 micro-grammes pour la femme enceinte et 200 micro-grammes pendant l'allaitement (Hetzel, 1997).

On trouve des données indiquant la possibilité d'obtenir par sélection/adaptation des souches de spiruline capables de fixer de l'iode (Mazo, 2004; Singh, 1994). Ces travaux manquent toutefois de clarté et les teneurs en iode annoncées semblent sujettes à caution. Comme les sels d'iode sont chers et que la spiruline ne semble pas, en conditions normales, concentrer activement cet élément, il est à craindre que l'enrichissement des milieux de culture n'aboutisse à un fort gaspillage. L'une des publications citée (Singh, 1994) propose, pour obtenir la fixation de l'iode, un enrichissement simultané en cobalt : non-seulement le cobalt lui-même n'est pas un micro-élément indispensable chez l'humain (car ce dernier ne peut synthétiser lui-même la vitamine B12 qui contient du cobalt), mais en plus les sels de cobalt sont maintenant reconnus cancérigènes (Lison, 2001). Du fait de l'importance de l'iode, il serait hautement souhaitable de continuer les recherches sur la possibilité d'enrichir la spiruline en cet élément. En particulier, d'autres états d'oxydation de l'iode devraient être testés dans les milieux de culture, par exemple l'iode élémentaire (sous forme d'anion  $I_3^-$ ), les iodates et les periodates.

L'ajout d'iode à la spiruline *après récolte* nous ramènerait par ailleurs aux problématiques de la « fortification » des aliments, avec entre autres les difficultés liées au contrôle de qualité du produit final (et donc à sa sécurité).

## 6.6. Autres minéraux

Tout comme le zinc a mis longtemps à apparaître dans toute son importance en matière de lutte contre la malnutrition, gageons qu'une série d'autres micro-nutriments arriverons à leur tour sous les feux de l'actualité... Le cuivre, par exemple, semble bien devoir être absorbé en quantité proportionnelle aux apports de zinc, sous peine de troubles cardiaques (Sandstead, 1995).

L'utilisation de spiruline comme véritable échangeur d'ions dans divers travaux portant sur la dépollution laisse penser que la plupart des éléments capables de former des cations (et plus encore des polycations) pourraient faire, si nécessaire, l'objet d'enrichissement dans la spiruline (Vannela, 2006). L'arrivée sur le marché de « super-spirulines » enrichies en fer, en zinc, en magnésium ou en sélénium montre bien le potentiel de cette démarche : s'y ajouteront certainement des spirulines enrichies en cuivre, en chrome, en manganèse... ou en une véritable palette de micro-éléments. Du point de vue de la lutte contre la malnutrition dans les pays en développement, cette perspective est à double tranchant. D'une part, il est hautement souhaitable que les teneurs en fer et en zinc (et peut-être en iode et en cuivre) puissent être optimisées dans les spirulines produites localement, mais d'autre part, il pourrait s'avérer dangereux de promouvoir l'ajout de certains éléments. Le sélénium présente un risque particulier : tous ses sels sont d'une manipulation dangereuse et, contrairement au zinc ou au cuivre, par exemple, de fortes surdoses dans une culture de spiruline n'aboutissent pas à la mort de la spiruline : celle-ci pourrait alors présenter des niveaux de sélénium potentiellement dangereux. De même, le chrome pourrait facilement atteindre des concentrations toxiques en cas d'erreur de dosage ou d'état d'oxydation (le chrome<sup>6+</sup> est cancérigène, alors que le chrome<sup>3+</sup> est beaucoup moins toxique).

Calcium, phosphore et magnésium sont présents dans la spiruline en quantités comparables à celles trouvées dans le lait. Les quantités relatives de ces éléments sont équilibrées ce qui exclut le risque de décalcification par excès de phosphore.

Une haute teneur en potassium est également à souligner car dans le cadre des pays industrialisés, bien des nutritionnistes s'élèvent contre les trop faibles rapports potassium/sodium de la grande majorité des aliments disponibles.

# 7. MICROFLORE ASSOCIEE AUX MILIEUX DE CULTURES ET AUX PREPARATIONS DE SPIRULINE



La microflore associée aux cultures de spiruline est généralement rare et non pathogène (Vermorel, 1975). De fait, l'alcalinité très élevée du milieu de culture (pH 8.5 à 11.0) constitue une excellente barrière contre la plupart des contaminations, aussi bien de bactéries que de levures, de champignons ou d'algues. De plus, il semble que certaines substances sécrétées ou contenues dans les spirulines possèdent une intéressante activité bactéricide ou au moins bactériostatique (Ozdemir, 2004). On notera à ce propos l'emploi en Afrique de spiruline, sous forme d'emplâtres, pour traiter des plaies gangrénées ou les ulcérations difficiles à cicatrifier (Z. Kasongo, communication personnelle).

Tant les données historiques décrivant la production de « tecuitlatl » au Mexique que l'observation des procédés traditionnels aboutissant au « dihé » actuel au Tchad semblent prouver la très bonne résistance de la spiruline à la contamination microbienne. Ces deux produits proviennent en effet du séchage naturel d'une biomasse de spiruline non-lavée et déposée à même le sable des sites de récolte. Les milieux naturels d'où la spiruline est (ou était) récoltée présentent pourtant des conditions d'hygiène extrêmement mauvaises puisque, dans le cas du Tchad, les berges des « wadis » sont librement accessibles au bétail, tandis que Farrar estime que la source de fertilisants nécessaire à l'importante production de « tecuitlatl » sur le lac Texcoco n'était autre que les égouts de la ville de Tenochtitlan...(Farrar, 1966).

En milieu synthétique, on compte normalement de  $3 \times 10^4$  à  $6 \times 10^5$  micro-organismes par millilitre de milieu de culture. (Santillan, 1974; Wu, 1981). Après récolte et séchage, la spiruline ne contient plus que  $10^3$  à  $10^6$  organismes revivifiables par gramme. Ce nombre diminue régulièrement avec le temps de stockage: même dans les préparations provenant de gisements naturels (beaucoup plus contaminées que les produits de culture, surtout du fait du séchage traditionnel à même le sol), après un mois de stockage on ne décèle plus de coliformes ni de streptocoques.

Les analyses bactériologiques de spirulines produites industriellement au Mexique (Santillan, 1974) ou aux USA (Earthrise, 1986) confirment l'absence totale de pathogènes tels que salmonella, shigella ou staphylocoques. Aucune contamination par des amibes dysentériques n'a pu être mise en évidence, aussi bien dans des sources naturelles (lac Tchad) que dans des bassins expérimentaux (Jacquet, 1975).

La conservation des préparations de spiruline séchée ne semble poser aucun problème puisque ce produit paraît tout à fait résistant aux moisissures (pour autant que son taux d'humidité reste dans les normes, voir plus bas sous « conservation »). Ainsi on n'a jamais détecté d'*Aspergillus Flavus* ni d'aflatoxine (sécrétée par ce dernier) dans des lots de spiruline (Jacquet, 1975). La spiruline industrielle contient moins de 100 spores de moisissures viables par gramme (Earthrise, 1986).

## 8. ETUDES TOXICOLOGIQUES

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

### 8.1. Recherche de toxiques minéraux

Dans plusieurs cas, les toxiques tels que le plomb, le mercure et l'arsenic (Santillan, 1974; Nippon-Ink, 1977) ainsi que le fluor (Santillan, 1974) ont été donnés comme non détectables; pourtant, une étude plus détaillée montre que dans le cas de spiruline récoltée en milieu naturel, les teneurs en arsenic et surtout en fluorures peuvent être relativement élevées. Ces particularités proviennent certainement des compositions géologiques des régions concernées, il reste toutefois à déterminer les facteurs d'accumulations de ces éléments en milieux contaminés. Notons que des essais menés sur des rats nourris avec de la spiruline naturelle comme seule source de protéines, n'ont montré aucun effet toxique de ces minéraux. (Boudène, 1975)

Ces problèmes de toxicité semblent inexistantes pour la spiruline cultivée en milieu artificiel puisque les valeurs observées sont en dessous des normes (IUPAC, 1974 OMS et FAO, 1972). On trouve en moyenne:

Arsenic	0.06 - 2 ppm
Sélénium *	0.01 - 0.04 ppm
Cadmium	0.01 - 0.1 ppm
Mercure	0.01 - 0.2 ppm
Plomb	0.6 - 5.1 ppm
Fluor **	112 - 630 ppm

\* Le fluor aurait pu être classé, tout comme le sélénium, dans la partie "oligo-éléments" vu leurs rôles essentiels dans l'alimentation humaine. Tous deux présentent toutefois plus de dangers, en cas de surdoses, que les oligo-éléments déjà mentionnés.

\*\* Seule une publication donne cette valeur (Bondène, 1975), ultérieurement réfutée (Chamorro-Cevallos, 1980).

Des travaux sur l'utilisation de la spiruline comme « bio-adsorbant » pour l'épuration de milieux contaminés en métaux lourds (Rangsayatorn, 2004; Solisio, 2006; Jagietto, 2006) montrent une forte capacité de la spiruline à fixer certains polycations, parmi lesquels le cadmium, le plomb, le chrome et le cuivre. Cette propriété reflète celle de la plupart des membranes bactériennes qui présentent une forte densité de sites anioniques (par exemple dus à des polysaccharides sulfatés ou à des fonctions carboxylates). D'un point de vue toxicologique, cette propriété pourrait s'avérer dangereuse si l'alcalinité élevée des milieux de culture de la spiruline ne limitait fortement la solubilité de la plupart des cations métalliques. De plus, la toxicité des métaux lourds pour la spiruline elle-même (particulièrement dans le cas du mercure) pourrait aussi contribuer à limiter le risque potentiel d'une telle contamination; la spiruline présente toutefois une assez grande tolérance à la toxicité du plomb (Chen, 2005). Il reste donc fortement conseillé d'effectuer des contrôles sur les teneurs en métaux lourds des spirulines destinées à l'alimentation humaine. Notons encore que cette faculté d'accumulation des métaux fait qu'il vaut infiniment mieux analyser un échantillon de spiruline que l'eau ou les engrais utilisés à sa production : les résultats obtenus seront bien plus fiables et bien plus significatifs en terme d'estimation du risque.

## 8.2. Recherche de toxiques organiques, mutagènes, tératogènes

Les éventuelles propriétés toxiques des paraffines citées plus haut (au point 2.3.3.) ont été étudiées sur le rat et le porc (Tulliez, 1975). La rétention de l'heptadécane (constituant majeur des paraffines de la spiruline) a été étudiée chez ces animaux recevant de la spiruline comme seule source de protéines. Chez le rat on constate une accumulation qui se stabilise vers le quatrième mois, à une valeur finale qui dépend de la teneur en lipides de l'animal. Chez le porc, l'heptadécane semble beaucoup mieux métabolisé et cet hydrocarbure est très faiblement retenu. Compte tenu de ce que l'on connaît de la toxicité des hydrocarbures, aucune toxicité aiguë ou chronique n'est à craindre (Tulliez, 1975).

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

La tératogénicité a été trouvée nulle pour trois espèces animales dans quatre étapes de gestation différentes, avec des concentrations de spiruline de 10, 20 et 30% de la diète. De même aucun effet mutagène ou de toxicité sub-aiguë ou chronique n'a été décelé (Chamorro-Cevallos, 1980; Bondène, 1975). La mutagénicité des urines d'animaux nourris de spirulines a été testée sur des bactéries (test d'Ames) sans résultat (Cifferi, 1983).

## 8.3 Cyanotoxines

On sait depuis longtemps que certaines cyanobactéries produisent de puissantes toxines agissant sur le système nerveux (l'anatoxine-A de *Anabaena flos-aquae*, par exemple) ou sur le foie (la microcystine de *Microcystis aeruginosa*, par exemple). Aucune contamination par de tels microorganismes n'a été, à notre connaissance, mise en évidence dans le cas de spiruline cultivée, ce qui semble lié à son milieu de culture très particulier. Bien que le problème ne soit semblé-t-il jamais apparu dans une culture artificielle, on sait que certains lacs tchadiens, producteurs de spiruline (*Arthrospira sp*), sont périodiquement envahis d'autres algues cyanophycées telles que *Anabaenopsis circularis* ou *Microcystis aeruginosa* (Léonard, 1967). On peut toutefois penser que le caractère saisonnier de ces contaminations reflète des changements de composition du milieu (forte baisse de salinité et de pH dues aux précipitations) qui ne devraient pas apparaître en culture artificielle. Suite à des épisodes de mortalité massives de flamants roses sur certains lacs comme les lacs Sonachi et Nakuru au Kenya (Metcalf, 2006), il a été fait état de souches d'*Arthrospira fusiformis* qui contiendraient des niveaux détectables de microcystines et/ou d'anatoxines (Ballot, 2004; Kotut, 2006). De nouvelles analyses effectuées sur ces souches avec une méthodologie fiable ont démontré l'absence totale de toxine, au point que les auteurs proposent même l'usage alimentaire des *Arthrospira* en question (Mussagy, 2006). Il convient toutefois de rester vigilants quand à la mise en culture de souches d'*Arthrospira* sauvages : des tests excluant la présence de cyanotoxines devraient être menés systématiquement sur de telles souches. A cette fin, la mise au point récente d'outils spécifiques peut être chaleureusement saluée ; il s'agit d'amorces PCR pour la détection de gènes impliqués dans la synthèse des cyanotoxines (Saker, 2007). On pourrait aussi envisager l'utilisation de cocktails d'anticorps pour la détection d'un ensemble de cyanotoxines par des tests rapides de type ELISA.

Il faut signaler que si la spiruline elle-même semble hors de cause, il n'en va pas nécessairement de même de certaines algues ou cyanobactéries d'eau douce récoltées sans véritable contrôle et ne bénéficiant aucunement des garanties toxicologiques entourant la spiruline (Carmichael, 1994). On trouve pourtant de tels produits, dérivés du genre *Aphanizomenon* et même du genre *Anabaena*, au moins sur le marché nord-américain (Kay, 1991).

En 2005, une publication a fait état, chez un grand nombre de cyanobactéries, de la présence d'une neurotoxine spécifique, la beta-N-méthylamino-L-alanine ou « BMAA », (Cox, 2005). Par précaution, certains produits alimentaires à base de spiruline avaient alors été retirés de la vente en Scandinavie, mais des analyses ultérieures ont montré l'absence de BMAA dans la spiruline. On relèvera aussi qu'une récente étude remet directement en cause la neurotoxicité du BMAA, même à fortes doses (Cruz-Aguado, 2006).

## 8.4 Résidus de pesticide

La quasi-absence de ravageurs ou de parasites dans les cultures de spiruline rend inutile l'usage de quelque pesticide que ce soit. Il n'en reste pas moins que l'on ne peut exclure d'emblée une contamination provenant de l'eau utilisée pour la culture ou de l'air, sous forme d'aérosols ou de poussières. La spiruline elle-même est très sensible à la plupart des herbicides, qu'ils agissent sur le métabolisme de l'azote (chlorate : Lanfaloni, 1994), sur le système photosynthétique comme les triazines ou encore sur la synthèse des lipides comme les pyridazinones (Cohen, 1993). Etrangement, la spiruline est capable de dégrader les herbicides de type « RoundUp » (glyphosate) qui agissent sur la synthèse de la chlorophylle : elle les minéralise totalement et en utilise le phosphore ainsi libéré (Trzebiatowska, 2004). Une fois encore, l'alcalinité du milieu de culture représente une certaine protection puisque qu'elle encourage l'hydrolyse de composés tels que les organo-phosphorés. L'ensemble de ces données explique sans doute l'absence dans la littérature de cas significatifs de contamination de spiruline par des pesticides.

## 8.5 Réactions allergiques

Contrairement à l'immense majorité des aliments courants, la spiruline ne semble

pratiquement jamais provoquer de réactions allergiques, que ce soit par ingestion ou par contact. Au contraire, une activité anti-allergique semble liée à ce produit (Yang, 1997). Dans une autre problématique liée au système immunitaire, on trouve deux descriptions de cas d'activation de maladies auto-immunes peut-être liées à la consommation de spiruline (Lee, 2004). Ces deux cas sont toutefois complexes car les patients en question avaient absorbés un grand nombre de substances médicamenteuses simultanément. Les auteurs de l'étude soupçonnent un lien direct avec la spiruline par le fait que des propriétés immunostimulantes lui sont attribuées, ce qui pourrait donc logiquement aggraver une maladie auto-immune pré-existante.

## 8.6 Risques de surdoses

Il n'existe à ce jour aucun cas de surdose de spiruline documenté dans la littérature scientifique. Des consommateurs de plus de 10 g/jour pendant plusieurs années d'affilé ne rapportent aucuns effets négatifs. En ce qui concerne le risque aigu, là non-plus aucune donnée ne vient fixer de limite : des consommations anecdotiques de plus de 100 g / jour n'ont semble-t-il eu aucune conséquence particulière. Seul indice manifeste d'une forte consommation de spiruline, l'accumulation bénigne de caroténoïdes dans la peau y provoque une légère coloration orangée (particulièrement visible dans la paume des mains). Cet effet « pilule-à-bronzer » est parfaitement réversible.

# 9. ACCEPTABILITE, FORMULATION ET CONSERVATION

## 9.1 Acceptabilité alimentaire

L'acceptabilité alimentaire de la spiruline a longtemps constitué un contre-argument systématique et a priori à son introduction dans les programmes nutritionnels. L'intensité de sa couleur verte et son extrême pouvoir colorant sur d'autres aliments l'empêche d'être « dissimulée » dans une préparation culinaire. D'autre part, si la spiruline fraîche ne présente pratiquement aucun arôme et aucun goût, il n'en va pas de même de la spiruline séchée (surtout si elle est réduite en poudre) : son odeur spécifique rappelle l'algue et le champignon et n'est pas du goût de tous, en tout cas dans le contexte culturel européen. Heureusement, l'expérience aidant, il a été démontré que l'acceptabilité alimentaire est excellente lorsque l'on s'adresse aux enfants en bas âges pour des doses de quelques grammes par jour (Picard, 1993; Tranquille, 1994; Sall, 1999; Degbey, 2004) ou lorsque des formulations basées sur des aliments traditionnels sont mises à contribution (Kapoor, 1992). Il se trouve que certaines des régions les plus touchées par la malnutrition sont aussi celles où l'introduction de spiruline peut être le plus facilement réalisée du fait de la nature des plats traditionnels (en Afrique : sauces accompagnant les bouillies de céréales, par exemple; en Inde, biscuits et friandises traditionnels).

## 9.2 Formulations alimentaires

Certaines propriétés physiques de la spiruline ont été déterminées afin d'en faciliter l'usage dans l'industrie alimentaire (Chronakis, 2001). On notera aussi l'intérêt manifesté pour la spiruline dans le domaine des « alicaments » : l'ajout de spiruline dans certains produits laitiers industriels a été envisagée (Varga, 1999; Varga, 2002). L'introduction de spiruline dans des aliments pour enfants a également fait l'objet de recherches (Chakravarthi, 2003) et depuis quelques années, une série de formulations de farines de sevrage contenant de la spiruline sont apparues dans divers pays : farine « Xeweul » au Sénégal, « SOSPI SOMA » en République Démocratique du Congo ou encore, au Burkina-Faso, amélioration de la formule « MISOLA » par ajout de spiruline (Simpore, 2006).

Remarquons que le prix de revient local d'une farine telle que le Xeweul du Sénégal serait largement au dessous du prix de fabrication dans ce même pays des formules recommandées par l'OMS (S. Couasnet, communication personnelle).

La courte cuisson nécessaire à la préparation des bouillies ne semble guère affecter les nutriments contenus dans la spiruline, si l'on en croit les mesures effectuées sur l'acide gamma-linoléique, l'un des composants les plus délicats de la spiruline (Dupire, 1998).

Composition de quelques farines de sevrage à la spiruline :

#### Farine XEWEUL développée au Sénégal

55%	Mil,
18%	Arachide,
14%	Niébé,
10%	Sucre,
3%	Spiruline.

Dose recommandée : 100g/jour

Prix indicatif (2005) : env. 800 CFA / kg (soit env. 1.3 euro / kg)

#### Farine SOSPISOMA développée au Congo-RDC

44%	Mais
22%	Sorgho
22%	Soya
10%	Sucre
2%	Spiruline

Dose recommandée : 100 g/jour

Prix indicatif (2006) : env. 1 euro / kg

#### Farine MISOLA + spiruline (Burkina-Faso)

Petit mil grillé :	60% (peut être remplacé par 30% riz + 30% mais)
Soja grillé :	20%
Arachide grillé :	10%
Sucre :	9%
Sel :	1%

L'association MISOLA + spiruline comporte 5 grammes de spiruline pour 100 grammes de MISOLA (Simpore, 2006).

Dose recommandée : 200 g/jour

Prix indicatif (MISOLA seul, 2005) : env. 700 CFA / kg (soit env. 1 euro / kg)

Parmi les nombreuses recettes développées localement en vue d'intégrer la spiruline aux repas quotidiens des adultes mais surtout des enfants, on peut relever l'utilisation en Inde de biscuits, bonbons et boissons à la spiruline.

Dans les pays riches, l'industrie alimentaire propose maintenant de nombreux produits enrichis à la spiruline (nouilles, soupes instantanées, barres énergétiques, etc.). Mais l'essentiel de la spiruline y est encore consommé sous forme de comprimés, de poudre ou de granulés de spiruline. Notons toutefois que la spiruline commence à faire l'objet de recherches culinaires et qu'un recueil de recettes à base de spiruline a été publié (Sisso, 2001). On trouve actuellement de très nombreux brevets portant sur des produits alimentaires à bases de spiruline, de la crème glacée aux boissons fermentées en passant par les yaourts et les bonbons.

### 9.3 Conservation

La spiruline fraîche (biomasse non-lavée, pressée jusqu'à une teneur en matière sèche comprise entre 20 et 30%) ne se conserve guère que quelques heures à température ambiante. Notons que le lavage de la spiruline après récolte (mais avant pressage) n'est pas conseillé : d'une part un lavage à l'eau douce provoque un choc osmotique qui peut faire éclater les cellules (certaines souches de spiruline sont particulièrement sensible à ce phénomène), d'autre part, dans bien des cas l'eau disponible pour ce « lavage » risque d'être elle-même contaminée. On risque alors un double effet négatif : suppression de la protection apportée par l'alcalinité du milieu de culture et contamination par des germes présents dans l'eau de lavage. Pressée sans lavage, la spiruline ne retient qu'une très faible quantité de milieu de culture (un film à la surface des filaments) dont le pH élevé ne porte à aucune conséquence alimentaire

car l'intérieur des cellules étant légèrement acide, le pH moyen de la biomasse ainsi préparée est quasiment neutre. Réfrigérée à 4°C, cette biomasse peut-être conservée deux à trois jours; cette période peut être portée à plus d'une semaine par ajout de sel (5 à 10%). Le mélange de biomasse de spiruline avec une huile alimentaire ainsi que certains condiments (herbes aromatiques) peut aussi prolonger sa bonne conservation. Il n'est pas impossible d'imaginer une filière commerciale pour la biomasse de spiruline fraîche, à l'état pure ou sous forme de préparation alimentaires (pâtés, sauces, pâtes à tartiner, etc.) : l'effort de développement et de marketing pourrait être similaire à ce qui a été mis en œuvre dans le cas du tofu en Europe.

La congélation de la biomasse de spiruline est possible mais doit s'effectuer aussi rapidement que possible (couches minces ou installations spéciales) sans quoi la taille des cristaux de glace produits endommage les filaments de spiruline. Dans ce dernier cas, il se produit, lors de la décongélation, une exsudation massive du contenu cellulaire, ce qui peut aboutir à un produit semi-gélifié d'un bleu profond tirant sur le pourpre (principalement dû aux phycocyanines) d'un aspect assez peu engageant. La congélation de la spiruline fraîche mériterait sans doute un effort de recherche afin de rendre ce produit commercialisable : outre les techniques de congélation, le développement d'additifs spécifiques pourrait être une piste à suivre.

Le séchage reste de loin le processus de conservation le plus utilisé pour la spiruline. Le séchage industriel sur tambours chauffant ne semble plus guère utilisé, par contre la pulvérisation dans l'air chaud (spray drying) reste la principale méthode pour les grosses productions. Cette technique présente le désavantage de provoquer une très forte fragmentation des filaments de spiruline, laissant les constituants cellulaires exposés à l'oxydation. Du point de vue de la qualité nutritionnelle et de la conservation, il semble préférable d'adopter les méthodes de séchage en couche mince par flux d'air à température modérées. Ces méthodes, développées par de petits producteurs artisanaux, sont maintenant adoptées par certains producteurs industriels : elles consistent à extruder une pâte de spiruline sous forme de filaments d'environ 2mm de diamètre qui sont déposés sur les grilles d'un séchoir. Une fois secs, ces filaments sont broyés grossièrement afin d'obtenir un produit en semoule plus ou moins fine. Réhydratée, une telle spiruline laisse apparaître sous le microscope des filaments multicellulaires pratiquement intacts. Une forte différence de conservation du bêta-carotène de la spiruline a été constatée suivant le type de séchage adopté (Seshadri, 1991).

Variante « basse technologie » de ce procédé, la pâte de spiruline peut aussi être étalée en fine couche sur une feuille de polyéthylène et directement mise à sécher au soleil; une fois sèche, elle se détache d'elle-même en flocons très fins. Dans ces conditions, et contrairement aux attentes, le contenu en carotène semble très peu affecté par l'exposition directe à la lumière solaire pendant plusieurs heures; même l'acide gamma-linolénique semble bien résister à ce traitement, peut-être parce que les pigments de la spiruline absorbent très efficacement la lumière à la surface du produit, et que d'autre part les cellules intactes protègent efficacement leurs contenus (Antenna tech. résultats non-publiés).

Le séchage en couches mince de la biomasse de spiruline a été étudié en détail du point de vue de ses caractéristiques thermodynamiques et cinétiques spécifiques (Desmorieux, 2006).

Le séchage de la spiruline sur « lit jaillissant » (spouted bed) a été testé avec succès (Gonçalves de Oliveira, 2006). Cette technique consiste à pulvériser une biomasse très liquide (env. 5% de matière sèche) sur des billes de matière synthétique constamment agitées par un courant d'air chaud. Le choc des billes entre elles détache continuellement la pellicule de matière sèche qui se forme à leurs surfaces et le produit en poudre tombe au fond de l'appareil.

Enfin, la technique du « mix-drying » semble prometteuse (Fox, 2004b) lorsqu'il s'agit de produire directement une préparation alimentaire contenant de la spiruline (une farine de sevrage par exemple). Dans ce cas, la biomasse de spiruline est d'abord mélangée à un produit sec (une farine par exemple); ce mélange est ensuite mis en forme et séché. Le grand avantage de cette technique est de baisser immédiatement le taux d'humidité de la spiruline afin de sortir au plus vite de la zone où l'activité de l'eau permet encore les réactions enzymatiques ainsi que le développement de micro-organismes contaminants.

La tenue du produit sec en terme de contenu nutritionnel répond avant tout à quatre paramètres :

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

Le taux d'humidité résiduel limite se situe vers 8% au delà duquel la croissance de moisissures et de

bactéries devient possible (Belay, 1997). La spiruline sèche présente un phénomène de bleuissement après une forte exposition à la lumière : en effet, la chlorophylle est assez vite détruite par des réactions photochimiques; la couleur bleue de la phycocyanine apparaît alors comme dominante. L'action combinée de la lumière et de l'oxygène est des plus dommageable : il est donc important de prévoir un conditionnement opaque.

La sensibilité à l'oxygène a été mesurée sur des spirulines séchées en poudre (filaments brisés) : une destruction du beta-carotène d'environ 50% en 5 mois a été observée en stockant à 25°C une telle spiruline dans de simples sachets de polyéthylène, alors que la même spiruline conservait 98% de son beta-carotène si elle était placée dans des sachets étanches à l'oxygène (Belay, 1997). Il est donc important de prévoir des emballages faisant barrière à l'oxygène (ce n'est pas le cas des simples sachets plastiques; seuls les plastiques comportant une couche anti-oxygène, généralement métallisée, conviennent). Il serait hautement souhaitable de répéter de telles expériences sur des spirulines séchées en filaments intacts afin de déterminer leur résistance à l'oxydation.

La spiruline en poudre préservée de la lumière et de l'oxydation ne perd que très peu de sa valeur nutritionnelle, même après 4 ans de stockage (Belay, 1997).

L'irradiation<sup>4</sup> de la spiruline séchée a été étudiée en détail (Minea, 2006), du moins en ce qui concerne l'irradiation par faisceaux d'électrons (rayonnement bêta). Pour des énergies de 6MeV et des doses ne dépassant pas 10 kGy, la perte de pouvoir anti-oxydant de la spiruline est de l'ordre de 10% (d'après des mesures d'inhibition de la peroxydation des lipides). Des doses de l'ordre de 40 kGy provoquent environ 50% de destruction du pouvoir anti-oxydant de la spiruline. Par mesure de la résonance paramagnétique électronique (RPE) ces mêmes travaux mettent en évidence un probable effet d'oxydation du fer de la spiruline (transformation du fer<sup>2+</sup> en fer<sup>3+</sup>) par l'irradiation beta . Cet effet semble déjà proche de la saturation vers 10 kGy, ce qui n'est guère favorable puisque le fer<sup>2+</sup> est nutritionnellement plus intéressant que le fer<sup>3+</sup>.

Pour la spiruline, la conservation par irradiation ne semble pratiquée jusqu'ici que par certaines firmes chinoises qui utilisent l'irradiation gamma par des sources de Cobalt<sup>60</sup>; les doses pratiquées, ainsi que l'impact sur les propriétés nutritionnelles et toxicologiques de la spiruline ainsi traitée ne sont pas connus. Au vu des réticences que provoque cette technologie, il serait souhaitable d'identifier des marqueurs physico-chimiques fiables afin de rendre possible la détection post-traitement sur la spiruline. Tant la signature paramagnétique électronique que le dosage de certains composés organiques issus spécifiquement de l'irradiation des acides gras insaturés (Stewart, 2000) pourraient constituer de bonnes pistes de recherche.

## 10. ESSAIS NUTRITIONNELS CHEZ L'HOMME

Sous certains aspects, l'essai le plus probant reste évidemment celui des populations consommant traditionnellement de la spiruline, comme les Kanembous du Tchad. Cette consommation, bien que régulière, est relativement faible, de l'ordre de 10 à 12 grammes par jour et par personne, sauf pour les femmes enceintes qui en consomment nettement plus (Delpeuch, 1975). Il s'agit donc surtout d'un supplément alimentaire; si le bénéfice en terme de protéine n'est pas évident au niveau quantitatif où il a été étudié (Delpeuch, 1975), il reste à déterminer les effets de complémentation en acides aminés essentiels, ainsi que l'apport des autres constituants de la spiruline. Il serait spécialement intéressant de savoir si ces populations souffrent de carences alimentaires, et de les comparer aux populations voisines qui ne consomment pas d'algues. Si l'on en croit le commentaire d'un document vidéo diffusé par la FAO sur la production traditionnelle de spiruline au Tchad, « le dihé<sup>5</sup>, depuis des siècles, est le secret d'une bonne santé pour la population locale » et « (...)les peuples de la région sont connus dans le pays car ils vivent plus longtemps et mieux. » (FAO, 2003).

Les essais cliniques portant sur l'efficacité de la spiruline sont encore rares et concernent

---

<sup>4</sup> La conservation des aliments par irradiation, est peu connue du grand public; c'est pourtant un procédé industriel largement répandu à travers le monde. Bien que fortement promue par un accord entre l'Organisation Mondiale pour la Santé (OMS) et l'Agence Internationale pour l'Energie Atomique (AIEA), cette technologie reste interdite dans bon nombre de pays. L'effet de l'irradiation sur la valeur nutritionnelle des denrées alimentaires reste controversé, de même que les dangers de l'implantation d'unités d'irradiation pouvant contenir d'immenses quantités d'isotopes hautement radioactifs.

<sup>5</sup> Dihé : nom local des galettes traditionnelles de spiruline au Tchad.

souvent un faible nombre d'individus. Parmi ces études « pionnières », on retiendra deux travaux qui portent sur un grand nombre d'individus:

L'expérience indienne citée plus haut à propos de la pro-vitamine A et portant sur 5'000 jeunes enfants (Seshadri, 1993).

A Bangui, en République Centre-Africaine, l'association « Nutrition Santé Bangui » qui gère un centre de renutrition infantile, produit et utilise depuis plus de quinze ans la spiruline. En 1993, plus de 300 enfants avaient déjà bénéficié d'un traitement de renutrition basé sur un mélange spiruline-sardines et la responsable du Centre, Mme M.-E. Picard , écrivait : « ces premières données permettent de se rendre compte de l'intérêt de la spiruline dans les problèmes de malnutrition même pour les formes sévères. C'est un produit facile à utiliser, bien accepté par les mères quand il a été bien expliqué. » (Picard, 1993). Par la suite, cette étude a été étendue et rendue comparative par l'observation d'un groupe de 592 enfants de 0 à 5 ans recevant le mélange sardine-spiruline, en comparaison d'un groupe de 182 enfants ne recevant, en complément du repas standard, que de la sardine. La durée du traitement variait de 94 à 145 jours et la dose de spiruline était de 5 g/jour. L'analyse des résultats montre une amélioration significativement supérieure pour les enfants ayant reçu de la spiruline, tant en ce qui concerne le gain de poids moyen que la vitesse de récupération (Dupire, 1998).

L'équilibre azoté a été étudié sur dix enfants âgés de 5 à 12 mois hospitalisés pour malnutrition sévère (Proteus, 1975). Ils ont reçu alternativement 2-3 grammes de protéines par kilo de poids corporel, sous forme de spiruline, de lait de vache ou de soya, pendant des périodes de quatre jours. L'absorption d'azote a été de 60% pour la spiruline et de 70% pour le soya mais la rétention a eu lieu en proportion inverse: 40% pour la spiruline et 30% pour le soya. Ainsi la rétention relative de la spiruline a été aussi élevée que celle du lait de vache, indiquant une excellente utilisation des protéines malgré une digestibilité moyenne.

A l'hôpital Bichat (France) l'absorption des protéines de la spiruline a été trouvée bonne; les tests ont été menés sur des enfants et des adultes dénutris qui ont reçu des doses massives de spiruline (80 à 90 grammes par jour) Malgré ces doses très importantes, aucune augmentation notable de l'acide urique dans le sang n'a pu être mise en évidence (Santillan, 1974).

Une étude portant sur 28 enfants atteints de maladies protéino-énergétiques patentes (Bucaille, 1990) a été réalisée de janvier à novembre 1989 au Zaïre (actuellement République Démocratique du Congo). Les paramètres mesurés lors de ce travail montrent l'effet globalement positif de la spiruline sur le statut nutritionnel des patients, et ce malgré les inévitables aléas d'une étude sur le terrain. Une étude chinoise portant sur 27 enfants âgés de 2 à 6 ans relève que la spiruline est "une véritable source de santé pour les enfants", après analyse de l'incidence d'un apport quotidien de 1.5 gramme de spiruline sur l'état de santé des enfants impliqués (Miao, 1987).

De nouvelles études ont été effectuées ces dernières années, malheureusement certaines d'entre elles font surtout ressortir la grande difficulté qu'il y a à construire et à suivre un protocole d'étude adéquat et rigoureux. En ce sens, une étude menée au Burkina-Faso et concluant à l'absence d'intérêt de la spiruline dans la renutrition des enfants (Branger, 2003) est l'exemple même de ce qu'il faudrait éviter. L'absurdité du protocole utilisé, ainsi que la gravité des conclusions que les auteurs s'autorisent néanmoins à publier ont été dénoncées à plusieurs reprises (Darcas, 2004; Falquet, 2004; Fox, 2004).

Au Burkina-Faso, une étude de réhabilitation nutritionnelle comparative, portant sur 84 enfants HIV-positifs et 86 enfants HIV-négatifs (Simpore, 2005) démontre non-seulement l'intérêt de la spiruline dans le traitement de la malnutrition infantile, mais aussi son impact particulièrement favorable dans la renutrition des enfants infectés par le virus du SIDA. Ce travail a été mené à Ouagadougou, en utilisant une spiruline produite localement à l'aide d'installations simples.

Au Sénégal, un essai portant sur 59 enfants atteints de malnutrition protéinoénergétique a donné un taux de guérison de plus de 88%, ce qui est jugé « remarquable ». De plus, l'étude mentionne une grande facilité d'administration de la spiruline, une bonne acceptabilité et une bonne tolérance de celle-ci (Sall, 1999b). Un essai nutritionnel randomisé et de plus grande envergure vient d'être terminé dans ce même pays (résultat non-encore publiés à ce jour) : son originalité est d'inclure non-seulement des paramètres biochimiques et cliniques, mais aussi une mesure des performances scolaires. Cette prise en compte des relations, maintenant solidement établies, entre nutrition et développement cognitif rend ce type d'étude particulièrement pertinente.

Au Niger, un essai mené sur 56 enfants en malnutrition grave a donné d'excellents résultats avec de fortes doses de spiruline (10 g/jour), selon des résultats préliminaires communiqués lors d'un



colloque international (Degbey, 2004).

En Inde, un essai randomisé portant sur 60 écolières s'est attaché non-seulement aux effets purement nutritionnels d'un apport d'une faible dose de spiruline (1 g/j) mais aussi à d'éventuels effets indirects sur leur performances intellectuelles (Sachdeva, 2004). Concluant à des effets positifs et statistiquement significatifs tant sur le statut hématologique des élèves que sur leurs performances intellectuelles, cette étude se termine par une recommandation au gouvernement indien quant à la fourniture gratuite de spiruline dans les écoles, particulièrement dans les régions déshéritées.

Il faut reconnaître que la plupart des essais nutritionnels cités ici, même publiés dans des revues scientifiques à comité de lecture, restent critiquables sous certains aspects. Il est bien sûr souhaitable que de prochaines études soient réalisées d'une manière plus concluante, mais il faut admettre que la difficulté est extrême : même lorsque l'équipe de recherche est compétente, que le protocole est adéquat et que les financements sont suffisants, il n'en reste pas moins que le contexte de tels études rend la mission extrêmement difficile. D'une part, le respect des normes éthiques limite fortement le type d'étude réalisable, d'autre part l'indispensable suivi des patients est souvent aléatoire et les « perdus de vue » sont généralement nombreux. Ajoutons à cela le fait que bien des pays où sévit la malnutrition sont aussi des régions politiquement troublées et l'on comprendra facilement que de nombreuses tentatives d'études n'aboutissent même pas.

Il n'en reste pas moins qu'au fil des ans l'accumulation de résultats positifs, joints à la masse grandissante des témoignages de professionnels de la santé, devrait commencer à faire réagir les décideurs du domaine de la lutte contre la malnutrition. On notera enfin que l'immense majorité (pour ne pas dire la totalité) des compléments nutritionnels recommandés par les instances internationales n'ont, eux, jamais fait l'objet de validations scientifiques indiscutables... ce qui ne semble guère perturber leurs promoteurs, surtout lorsqu'ils possèdent des droits sur la fabrication de telles formules.

En matière de lutte contre la malnutrition, il faut encore signaler un nombre croissant de témoignages attestant d'un effet très positif de la spiruline sur le regain d'appétit des enfants dénutris : ce facteur que les spécialistes considèrent comme crucial mériterait amplement des études spécifiques. Si cette propriété était avérée, elle pourrait à elle seule justifier l'ajout de spiruline à des formules de renutrition classiques.

## 11. CONCLUSION

Au vu des propriétés nutritionnelles sans égal de la spiruline, ainsi que du nombre croissant de publications scientifiques en analysant tel ou tel aspect, il apparaît clairement que la spiruline devrait connaître ces prochaines années un très important développement tant dans les pays industrialisés que dans les pays frappés par la malnutrition. Il ne fait guère de doute que l'on verra sous peu toute une gamme d'« alicaments » basés sur la spiruline arriver sur les marchés des pays riches. Pour une fois, le terme d'aliment pourrait être employé à juste titre, tant le nombre et la qualité des études scientifiques portant sur la spiruline attestent de sa réelle valeur nutritionnelle et de certains effets thérapeutiques.

Dans le domaine de la lutte contre la malnutrition, la mise en avant de concepts comme le « développement endogène », la « souveraineté alimentaire » ou la prise en compte de la nécessité de produire *localement* des compléments alimentaires de hautes valeurs, plaideront naturellement pour la diffusion des techniques simples de production de spiruline. Il y a peu, des experts de la FAO concluaient l'une de leurs publications par cette phrase (Tontisirin, 2002) :

“Linking community development policies to national programmes for the alleviation of hunger and malnutrition, with an emphasis on increasing the variety of foods consumed, is probably the best strategy for improving micronutrient malnutrition sustainably.”

*(Lier des politiques de développement communautaire aux programmes d'éradication de la faim et de la malnutrition, en mettant l'accent sur la diversification des aliments consommés, représente probablement la meilleure stratégie pour réduire durablement la malnutrition due au manque de micronutriments).*

Souhaitons que cette diversification des aliments prenne en compte la spiruline et que sa production locale soit reconnue au titre de développement communautaire : nul doute alors qu'un pas important aura été accompli dans l'éradication de la malnutrition.

## 12. BIBLIOGRAPHIE

- Abdulqader G., Barsanti L. & Mario R. Tredici MR (2000)  
Harvest of *Arthrospira platensis* from Lake Kossorom (Chad) and its household usage among the Kanembu  
Journal of Applied Phycology 12: 493–498
- AFAA (1982)  
Association française pour l'algologie appliquée  
Actes du premier symposium sur la spiruline *Spirulina Platensis* (Gom.) Geitler de l'AFAA.
- Al'bitskaia ON, Zaitseva GN, Rogozhin SV, Pakhomova MV, Oshanina NP. (1979)  
Comparative evaluation of methods for isolating total protein from the biomass of *Spirulina platensis*  
Prikl Biokhim Mikrobiol. 15(4):612-7.
- Annapurna V. et al. (1991)  
Bioavailability of spirulina carotenes in preschool children  
J. Clin. Biochem Nutrition. 10 145-151.
- Anusuya D. m. et Venkataraman L. V., (1983)  
Supplementary value of the proteins of the blue green algae *Spirulina platensis* to rice and wheat proteins  
Nutr. Rep. Internat., 28:1029-1035.
- Arai S, Yamashita M, Fujimaki M. (1976)  
Enzymatic modification for improving nutritional qualities and acceptability of proteins extracted from photosynthetic microorganisms *Spirulina maxima* and *Rhodospseudomonas capsulatus*.  
J Nutr Sci Vitaminol (Tokyo) 22(6):447-56.
- Ayehunie S., et al. (1996)  
Inhibition of HIV-1 replication by an aqueous extract of *Spirulina platensis* (*Arthrospira platensis*).  
International Association of Applied Algology, 7th International Conference. 16 april 1996, Knysna, South Africa.
- Ballot, A; Krienitz, L; Kotut, K; Wiegand, C; Pflugmacher, S (2005)  
Cyanobacteria and cyanobacterial toxins in the alkaline crater lakes Sonachi and Simbi, Kenya  
Harmful Algae [Harmful Algae]. Vol. 4, no. 1, pp. 139-150. .
- Baojiang G. et al. (1994)  
Study on effect and mechanism of polysaccharides of spirulina on body immune function improvement  
Proc. of Second Asia Pacific Conf. on Algal Biotech. Univ. of Malaysia. pp 33-38.
- Becker E.W. (1993)  
Development of spirulina Research in a Developing Country - India  
Bull. Inst. Océano, Monaco, n°spécial 12, 49-57.
- Belay A. (1997)  
Mass culture of *Spirulina platensis* - The Earthrise farms Experience  
In "Spirulina platensis (*Arthrospira*)" Ed. Avigad Vonshak, Taylor & Francis, Londre, pp.131-158

- Belay A. and Ota Y. (1993)  
Current knowledge on potential health benefits of spirulina  
Journal of Appl. Phycology, 5:235-241.
- Biorigin (2006)  
Documentation Biorigin pour "Azina" et "Ferrina", spiruline enrichie en zinc ou en fer  
<http://www.biospirulina.ch/>
- Black M.M. (2003)  
The evidence linking zinc deficiency with children's cognitive and motor functioning  
J. Nutr. 133:1473-1476
- Bories G. et Tulliez J. (1975).  
Détermination du 3,4-benzopyrène dans les algues spirulines produites et traitées suivant différents procédés  
Ann. Nutr. Aliment. 29, 573-575.
- Boudène C., Collas E. et Jenkins C. (1975)  
Recherche et dosage de divers toxiques minéraux dans les algues spirulines de différentes origines, et évaluation de la toxicité a long terme chez le rat d'un lot d'algues spirulines de provenance mexicaine  
Ann. Nutr. Aliment. 29, 577-587.
- Branger B, Cadudal JL, Delobel M, Ouoba H, Yameogo P, Ouedraogo D, Guerin D, Valea A, Zombre C, Ancel P.(2003)  
La spiruline comme complément alimentaire dans la malnutrition du nourrisson au Burkina-Faso  
Arch Pediatr. 10(5):424-31.
- Briend A. (1998)  
La malnutrition de l'enfant  
Institut Danone, rue du Duc 100, Bruxelles
- Bucaille P. (1990)  
Intérêt et efficacité de l'algue spiruline dans l'alimentation des enfants présentant une malnutrition protéino-énergétique en milieu tropical  
Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier Toulouse III, 10 oct 1990
- Bujard-E, U. Braco-U, Mauron-J, Mottu-F, Nabholz-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, Washington 1970.
- Campanella L., Crescentini G. and Avino P. (1999)  
Chemical composition and nutritional evaluation of some natural and commercial food products based on Spirulina  
Analisis, 1999, 27, 533-540
- Campbell J 3rd, Stevens SE Jr, Balkwill DL. (1982)  
Accumulation of poly-beta-hydroxybutyrate in Spirulina platensis.  
J Bacteriol. 149(1):361-3.

Careri M, Furlattini L, Mangia A, Musci M, Anklam E, Theobald A, von Holst C. (2001)  
Supercritical fluid extraction for liquid chromatographic determination of carotenoids in *Spirulina*  
*Pacifica* algae: a chemometric approach.  
*J Chromatography A* 912: 61–71.

Carmichael W. (1994)  
The Toxins of Cyanobacteria  
*Sci. Am. janv.*94, 64-72.

Cases J., Puig M., Caporiccio B., Baroux B., Baccou J.-C., Besancon 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*, Volume 65, Number 2, pp. 207-211(5)

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.* 131(9):2343-50.

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.

Chakravarthi S, Kapoor R. (2003)  
Development of a nutritious low viscosity weaning mix using natural ingredients and microbial  
amylases.  
*Int J Food Sci Nutr.* 54(5):341-7.

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

Chamorro-Cevallos-G.(1980)  
Toxicologic Research on the Alga *Spirulina*  
United Nations Organisation for Industrial Development, 24 Oct. 1980.

Chen H. et Pan S. (2005)  
Bioremediation potential of spirulina: toxicity and biosorption studies of lead  
*J Zhejiang Univ SCI* 2005 6B(3):171-174

Chen T, Zheng W, Wong YS, Yang F, Bai Y. (2005)  
Accumulation of selenium in mixotrophic culture of *Spirulina platensis* on glucose.  
*Bioresour Technol.* 2005 Dec 8;

Chronakis IS. (2001)  
Gelation of edible blue-green algae protein isolate (*Spirulina platensis* Strain *Pacifica*): thermal  
transitions, rheological properties, and molecular forces involved.  
*J Agric Food Chem.* 49(2):888-98.

Ciferri O. (1983).  
*Spirulina*, the Edible Microorganism.  
*Microbiol. Rev.* 47, 551-578.

- Ciferri O. et Tiboni O. (1985).  
The Biochemistry and Industrial Potential of Spirulina  
Ann. Rev. Microbiol. 39, 503-526.
- Clément G. (1975).  
Production et constituants caractéristiques des algues Spirulina platensis et maxima  
Ann. Nutr. Aliment. 29, 477-487.
- Clément G., Giddey C. et Menzi R. (1967).  
Amino Acid Composition and Nutritive Value of the Alga Spirulina Maxima  
J. Sci. Fd. Agric. 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. (1997)  
Chemicals from Spirulina  
in "Spirulina platensis : Physiology, cell-biology and biotechnology"  
Ed. A. Vonshak, Taylor & Francis Ltd 1997
- Colla LM, Bertolin TE, Costa JA. (2004)  
Fatty acids profile of Spirulina platensis grown under different temperatures and nitrogen concentrations.  
Z Naturforsch [C]. 59(1-2):55-9.
- Contreras A., Herbert D.C. , Grubbs B.G. et Cameron I.L.(1979)  
Blue-Green Alga, Spirulina, as the Sole Dietary Source of Protein in Sexually Maturing Rats  
Nutr. Rep. Int. 19, No 6, 749-763.
- Cox PA, Banack SA, Murch SJ, Rasmussen U, Tien G, Bidigare RR, Metcalf JS, Morrison LF, Codd GA 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
- Darcas C. (2004)  
Spiruline et malnutrition  
Arch Pediatr. 11(5):466-7
- Degbey H., Boureima H. et Oumarou H. (2004)  
Evaluation de l'efficacité de la supplémentation en spiruline du régime habituel des enfants atteints de malnutrition sévère  
Colloque international « Les Cyanobactéries pour la Santé, la Science et le Développement » Île des Embiez 3-6 mai 2004
- Delpeuch F., Joseph A. et Cavelier C. (1975)  
Consommation alimentaire et apport nutritionnel des algues bleues (Oscillatoris platensis) chez quelques populations du Kanem (Tchad)  
Ann. Nutr. Aliment. 29, 497-515.

Desmorieux H. et Decaen N. (2006)  
Convective drying of Spirulina in thin layer  
Journal of Food Engineering 77, 64–70

Dillon J.C. et Phan P.A. (1993)  
Spirulina as a source of proteins in human nutrition  
Bull. Inst. Océano, Monaco, n°spécial 12, 103-107.

Dillon J.C., Phuc A.P. et Dubacq J.P. (1995)  
Nutritional value of the alga Spirulina  
World Rev Nutr Diet. 77:32-46.

Dupire J. (1998)  
Objectif: malnutrition  
Edition Similia, 71 r Beaubourg 75003 Paris

Durand-Chastel (1999)  
Production of Spirulina biomass rich in gamma-linolenic acid and sulfolipids  
Marine Cyanobacteria NS19 (dissem.), pp. 541-546 in Bull. Inst. océanogr. (Monaco)

Earthrise Farms Spirulina (1986)  
Product Typical Analysis  
Earthrise Farms Spirulina, San Rafael, USA.

Evets L., et al. (1994)  
Means to normalize the levels of immunoglobulin E, using the food supplement Spirulina  
Grodenski State Medical Univ. Russian Federation Committee of Patents and Trade. Patent  
(19)RU (11)2005486. Jan. 15, 1994. Russia.

Falquet J, von der Weid D. (2004)  
Spiruline et malnutrition  
Arch Pediatr. 11(5):465

FAO (2003)  
L'algue bleue du désert  
Film vidéo produit par A. Proto, Division de l'Information, FAO's Inter-Departmental Working Group  
on Biological Diversity for Food and Agriculture

Farrar W.V. (1966)  
Tecuitlatl; a glimpse of aztec food technology  
Nature 211, 341-342

Fox R, Pagnon Y, Weber B. (2004)  
Spiruline et malnutrition  
Arch Pediatr. 11(5):465-6

Fox R. (2004b)  
Nouvelles utilisations de la spiruline  
Compte-rendu du Colloque international : C SSD « Les Cyanobactéries pour la Santé, la Science et  
le Développement » Les Embiez, 2004

Fox R.D. (1980)  
Algoculture: la spiruline  
Edisud 1980

Fukino H., et al. (1990).  
Effect of spirulina on the renal toxicity induced by inorganic mercury and cisplatin  
Eisei Kagaku, 36:5.

Furst PT (1978)  
Spirulina  
Human Nature, 1(3), 60-65.

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

Gireesh T., Jayadeep A., Rajasekharan K. N., Menon V. P., Vairamany M., Tang G., Nair P. P.,  
Sudhakaran P. R. (2001)  
Production of deuterated  $\beta$ -carotene by metabolic labelling of *Spirulina platensis*  
Biotechnol. lett. vol. 23, no6, pp. 447-449

Gireesh T., Nair PP., Sudhakaran PR (2004)  
Studies on the bioavailability of the provitamin A carotenoid, beta-carotene, using human exfoliated  
colonic epithelial cells  
British Journal of Nutrition, Volume 92, Number 2, pp. 241-245(5)

Gomez-Coronado DJ, Ibanez E, Ruperez FJ, Barbas C. (2004)  
Tocopherol measurement in edible products of vegetable origin.  
J Chromatogr A. 1054(1-2):227-33.

Gonçalves de Oliveira E. (2006)  
Sacagem de *Spirulina platensis* : análise das técnicas de leito de jorro e camada delgada  
Thèse de l'Université de Rio Grande (Brésil), Dpt. De Chimie

Gustafson K., et al. August 16, (1989)  
AIDS- Antiviral sulfolipids from cyanobacteria (blue-green algae)  
Journal of the National Cancer Institute, 81(16) 1254. USA.

Guyton A.C. (1986).  
Textbook of Medical Physiology.  
7th. ed. W.B. Saunders Company.

Harriman GR; Smith PD; Horne MK; Fox CH; Koenig S; Lack EE; Lane HC; Fauci AS (1989)  
Vitamin B12 malabsorption in patients with acquired immunodeficiency syndrome  
Arch.Intern.Med.149(9): 2039-41.

Hattori Y. (2002)  
Diseases and Pathophysiology Arising from Biopterin Dysregulation  
J. Med. Sci.22(3): 99-100

Hau R, (1995)  
Vitamin B12 in der Mikroalge Spirulina platensis  
FIT fürs LEBEN 1, 29

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

Herbert V., Drivas G., Foscardi R. (1982)  
Multivitamin/mineral food supplement containing vitamin B12 may also contain analogues of B12.  
N. Engl. J. Med., vol.307, pp 255-256

Hetzel B. et Pandav C. (1997)  
SOS pour un milliard  
Presses de l'Université d'Oxford, Great Clarendon Street, Oxford.

Hudson-BJF & Karis-IG (1974)  
The Lipids of the Alga Spirulina  
J. Sci. Fd. Agric. 25, 759-763.

Hwang D. (1989)  
Essential fatty acids and immune response  
FASEB J. 3:2052-2061.

Jacquet J. (1975)  
Microflore des préparations de spirulines  
Ann. Nutr. Aliment. 29, 589-601.

Jagiello M., Minta E., Chojnacka K. et Kafarski P. (2006)  
Mode of Biosorption of Chromium(III) by Spirulina Species Cells from Aqueous Solutions  
Water Environment Research, Volume 78, Number 7, pp. 740-743

Johnson P. et Shubert E. (1986)  
Availability of iron to rats from spirulina, a blue-green algae  
Nutrition Research 6, 85-94.

Jourdan J.P. (1996)  
Cultivez votre spiruline  
Ed. Antenna Technologies

Kapoor R et Mehta U. (1992)  
Development and sensory evaluation of Spirulina supplemented recipes  
In "Spirulina National Symposium" Ed. Seshadri CV et Jeeji Bai N. Madras, 1992, pp 134-139

Kapoor R et Mehta U. (1993)  
Utilization of beta-carotene from Spirulina platensis by rats  
Plant-Foods-Hum-Nutr. 43(1): 1-7



- Kapoor R, Mehta U (1993b)  
Iron status and growth of rats fed different dietary iron sources.  
Plant Foods Hum Nutr 44:29-34
- Kapsiotis G, Béhar M, DeMayer EM, Teply-LJ & Venkatachalam-PS  
Acceptable Limits of Nucleic Acid in SCP for Various Age Groups and Diet Patterns  
PAG Bulletin, 5(3),18-26.
- Karel M. and Kamarei AR. (1984)  
Feasibility of producing a range of food products from a limited range of undifferentiated major food component  
NASA CELSS Program final report, NASA-Ames Research Center Moffett Field, California
- Kay R.A. (1991)  
Microalgae as Food and Supplement  
Critical Reviews in Food Science and Nutr. 30(6):555-573. Pub. by CRC Press.USA.
- Kelly RJ, Gruner TM, Furlong JM, Sykes AR (2005)  
Analysis of corrinoids in ovine tissues.  
Biomed Chromatogr, Volume 20, Issue 8 , Pages 806 - 814
- Kondo H., Kolhouse JF. Et Allen H. (1980)  
Presence of cobalamin analogues in animal tissues.  
Proc. Natl. Acad. Sci. USA vol. 77, N°2, pp. 817-821
- Kotut K, Ballot A, Krienitz L. (2006)  
Toxic cyanobacteria and their toxins in standing waters of Kenya: implications for water resource use.  
J. Water Health. 4(2):233-45.
- Lanfalconi L, Cappanna E, Gualerzi CO (1994)  
Isolation and characterization of a chlorate-resistant mutant of *Spirulina platensis*  
New Microbiol, 17(2):133-40
- Lee AN, Werth VP. (2004)  
Activation of autoimmunity following use of immunostimulatory herbal supplements.  
Arch Dermatol.140(6):723-7.
- Lee J.-B., Hayashi T., Hayashi K., Sankawa U. (2000)  
Structural Analysis of Calcium Spirulan (Ca-SP)-Derived Oligosaccharides Using Electrospray Ionization Mass Spectrometry  
J. Nat. Prod., 63 (1), 136 -138
- Lee J.-B., 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 vol. 61, no9, pp. 1101-1104
- Lehninger A.L. (1975)  
Biochemistry, the Molecular basis of Cell Structure and Function  
Worth Publishers, Inc.

Leitzmann C. (1993)  
Vitamin B12 actuelier Stand der Forschung  
FIT fürs LEBEN 6, 12-15

Léonard J. (1966)  
The 1964-65 Belgian Trans-saharan Expedition  
Nature 209, 126-128

Léonard-J et Compère-P (1967)  
Spirulina platensis (Gom.) Geitler, algue bleue de grande valeur alimentaire par sa richesse en protéines  
Bull. Nat. Plantentuin Belg. 37 (1),Suppl.23

Li ZY, Guo SY, Lin L (2003)  
Bioeffects of selenite on the growth of Spirulina platensis and its biotransformation  
Bioresour. technol. vol. 89, no2, pp. 171-176

Lison D, De Boeck M, Verougstraete V, Kirsch-Volders M. (2001)  
Update on the genotoxicity and carcinogenicity of cobalt compounds.  
Occup Environ Med. 58(10):619-25.

Loseva L.P. and I.V.Dardynskaya.(1993)  
Spirulina- natural sorbent of radionucleides  
Research Institute of Radiation Medicine, Minsk,Belarus. 6th Int'l Congress of Applied Algology,  
Czech Republic.

Manen J.F et Falquet J. (2002)  
The cpcB--cpcA locus as a tool for the genetic characterization of the genus Arthrospira  
(Cyanobacteria): evidence for horizontal transfer  
International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology (2002), 52, 861-867

Manuel Merck (1994)  
Manuel de Diagnostic et Thérapeutique  
2e ed. française, éditions d'Après, Paris 1994

Martinez-Nadal N.G. (1971)  
Sterols of Spirulina maxima  
Phytochem., 10, 2537.

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

Melchior J.C., Goudet O. (1997)  
Nutrition et infection par le VIH  
Ed. Masson, Paris

Mendes RL, Alberto DR, Antonio FP (2006)  
Supercritical CO2 extraction of g-linolenic acid and other lipids from Arthrospira (Spirulina)maxima:  
Comparison with organic solvent extraction  
Food Chemistry, Volume 99, Issue 1, Pages 57-63

- Metcalf JS, Morrison LF, Krienitz L, Ballot A, Krause E, Kotut K, Pütz S, Wiegand C, Pflugmacher S, Codd A. (2006)  
Analysis of the cyanotoxins anatoxin-a and microcystins in Lesser Flamingo feathers  
Toxicological and Environmental Chemistry Vol. 88, Nb 1 p.159 - 167
- Miao Jian Ren (1987)  
Spirulina in Jiangxi China  
Academy of Agricultural Science. Presented at Soc. Appl. Algology, Lille France Sep. 1987.
- Minea R., Brasoevanu M., Grecu MN et Nemtanu MR (2006)  
Preliminary Studies on Irradiated Spirulina  
Rom. Journ. Phys., Vol. 51, Nos. 1–2, P. 141–145, Bucharest
- Mitchell GV; Grundel E; Jenkins M; Blakely SR (1990)  
Effects of graded dietary levels of Spirulina maxima on vitamins A and E in male rats  
J.Nutr. 1990 Oct; 120(10): 1235-40
- Mühling M., Belay A., Whitton B. (2005)  
Variation in fatty acid composition of Arthrospira (Spirulina) strains  
Journal of Applied Phycology, Volume 17, Number 2, pp. 137-146(10)
- Mussagy A., Annadotter H. et Cronberg G. (2006)  
An experimental study of toxin production in Arthrospira fusiformis (Cyanophyceae) isolated from African waters  
Toxicon (in press, accepté le 21 août 2006)
- Nayaka N., Homma Y., Goto Y. (1988)  
Cholesterol lowering effect of spirulina.  
Nutrition Reports Internat. 37(6), 1329-1337.
- Nelissen B., Wilmotte A., Neefs J.-M. et De Wachter R. (1994)  
Phylogenetic relationships among filamentous helical cyanobacteria investigated on the basis of 16S ribosomal RNA gene sequence analysis  
Systematic and applied microbiology vol. 17, no2, pp. 206-210
- Nichols-BW & Wood-BJ (1968)  
The Occurrence and Biosynthesis of Gamma-Linolenic Acid in a Blue-Green Alga, Spirulina Platensis  
Lipids. January 1968, 3(1), 46-50.
- Nippon Ink & Chemicals (1977).  
"Spirulina".  
Bull Tech Dye Nippon
- Noguchi Y, Ishii A, Matsushima A, Haishi D, Yasumuro K, Moriguchi T, Wada T, Koderu Y, Hiroto M, Nishimura H, Sekine M, Inada Y.(1999)  
Isolation of Biopterin-alpha-glucoside from Spirulina (Arthrospira) platensis and Its Physiologic Function.  
Mar Biotechnol (NY).1(2):207-210.

NRC : National Research Council (1980)  
Recommended Dietary Allowances  
9th ed. Washington, DC: National Academy Press.

Otles S, Pire R. (2001)  
Fatty acid composition of *Chlorella* and *Spirulina* microalgae species.  
J AOAC Int. 84(6):1708-14.

Ozdemir G, Karabay NU, Dalay MC, Pazarbasi B. (2004)  
Antibacterial activity of volatile component and various extracts of *Spirulina platensis*  
Phytother Res, Volume 18, Issue 9, 754-757

PAG : Protein Advisory Group of U.N. (1974).  
Recent Developments in *Spirulina*  
PAG Bulletin, 3(4), 4-7.

Palla-JC & Busson-F (1969).  
Etude des caroténoïdes de *Spirulina platensis* (Gom.) Geitler (Cyanophycées)  
C.R. Acad. Sc. Paris, t.269 p.1704-1707.

Pang QS; Guo BJ; Ruan JH (1988)  
Enhancement of endonuclease activity and repair DNA synthesis by polysaccharide of *Spirulina platensis*  
I Chuan Hsueh Pao. 1988; 15(5): 374-81

Paoletti C., Vincenzini M., Bocci F. et Materassi R. (1981)  
Composizione biochimica generale delle biomasse di *Spirulina platensis* e *S. maxima*  
In "Estratto da Atti del Convegno Prospettive della coltura di *Spirulina* in Italia", p. 11, Firenze:  
Tipographia Coppini.

Pascaud M. et Brouard C. (1991)  
Acides gras polyinsaturés essentiels w6 w3. Besoins nutritionnels, équilibres alimentaires  
Cah. Nutr. Diet. XXV 13:185-190.

Pascaud M., (1993)  
The essential polyunsaturated fatty acids of spirulina and our immune response  
Bull. Inst. Océano, Monaco, n°spécial 12, 49-57 .

Picard M.-E. (1993)  
Utilisation de la spiruline au Centre Nutritionnel  
Nutrition Santé Bangui, 49-50 Bd Van Iseghem, Nantes

Planes P.; Rouanet J.-M.1; 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, Volume 77, Number 2, pp. 213-218(6)

Proteus, Inc. (1975)  
Clinical Experimentation With *Spirulina*  
National Institut of Nutrition, Mexico City, 1975.(transl. by Proteus, Inc. 1975)

- Puyfoulhoux G, Rouanet JM, Besançon P, Baroux B, Baccou JC, Caporiccio B (2001)  
Iron availability from iron-fortified spirulina by an in vitro digestion/Caco-2 cell culture model  
J Agric Food Chem 49:1625-9
- Qishen P., Kolman et al. (1989)  
Radioprotective effect of extract from spirulina in mouse bone marrow cells studied by using the micronucleus test  
Toxicology Letters 48: 165-169.
- Qiuhui H. (1999)  
Supercritical Carbon Dioxide Extraction of Spirulina platensis Component and Removing the Stench  
J. Agric. Food Chem., 47 (7), 2705 -2706
- Quasney ME., Carter LC., Oxford C., Watkins SM., Gershwin ME., German JB. (2001)  
Inhibition of proliferation and induction of apoptosis in SNU-1 human gastric cancer cells by the plant sulfolipid, sulfoquinovosyldiacylglycerol.  
J Nutr Biochem. 12(5):310-315.
- Quillet M. (1975).  
Recherches sur les substances glucidiques élaborées par les spirulines  
Ann. Nutr. Aliment. 29, 553-561.
- Quoc KP., Dubacq J.-P., Demandre C. et Mazliak P. (1994)  
Comparative effects of exogenous fatty acid supplementations on the lipids from the cyanobacterium Spirulina platensis  
Plant physiology and biochemistry, vol. 32, n°4, pp. 501-509
- Rangsayatorn N, Pokethitiyook P, Upatham ES, Lanza GR. (2004)  
Cadmium biosorption by cells of Spirulina platensis TISTR 8217 immobilized in alginate and silica gel  
Environ Int. 30(1):57-63.
- Rechter S, König T, Auerochs S, Thulke S, Walter H, Dornenburg H, Walter C, Marschall M. (2006)  
Antiviral activity of Arthrospira-derived spirulan-like substances  
Antiviral Res. vol. 72, n°3 (2006) p. 197-206.
- Ribadeneira M., Garcia P. (2006)  
Comparative analysis of the use of a 100% vegetable iron and iron sulfate as iron source for the treatment of ferriprive anemia  
A publier; cité dans Phytonutrition et Environnement, JM Robin
- Ross E; Dominy W (1990)  
The nutritional value of dehydrated, blue-green algae (Spirulina platensis) for poultry  
Poult.Sci. 1990 May; 69(5): 794-800
- Rule SA., Hooker M., Costello C., Luck W et Hoffbrand AV (1994)  
Serum vitamin B12 and transcobalamin levels in early HIV disease  
Am-J-Hematol. 47(3): 167-71
- Sachdeva R., Kaur R. and Kaur Sangha J. (2004)  
Effect of Supplementation of Spirulina on the Haematological Profile and Intellectual Status of School Girls (7-9 years)  
J. Hum. Ecol., 15(2): 105-108

- 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. et Kuakuwi N. (1999)  
 La spiruline: une source alimentaire à promouvoir  
*Médecine d'Afrique Noire* : 46 (3) pp 140-141
- Sall MG., Dankoko B., Badiane M., Ehua E. et Kuakuwi N. (1999b)  
 Résultats d'un essai de réhabilitation nutritionnelle avec la spiruline à Dakar  
*Médecine d'Afrique Noire* : 46 (3) pp 143-146
- Sandstead H. (1995)  
 Requirements and toxicity of essential trace elements, illustrated by zinc and copper  
*Am J Clin Nutr* 61(suppl):621-624
- Santillan C. (1982)  
 Mass Production of Spirulina  
*Experientia*, 38, 40.
- Santillan C. (1974)  
 Cultivation of the Spirulina for Human Consumption and for Animal Feed  
 International Congress of Food Science and Technology, Madrid (Spain) September 1974.
- Sautier C. et Trémolières J. (1975)  
 Valeur alimentaire des algues spirulines chez l'homme  
*Ann. Nutr. Aliment.* 29, 517-533.
- Scheldeman P., Baurain D., Bouhy R., Scott M., Mühlhng M., Whitton BA., Belay A., Wilmotte A. (1999)  
 Arthrospira ('Spirulina') strains from four continents are resolved into only two clusters, based on amplified ribosomal DNA restriction analysis of the internally transcribed spacer  
*FEMS Microbiology Letters* Vol. 172, n°2 p. 213
- Semba RD; Miotti PG; Chipangwi JD; Saah-AJ; Canner JK; Dallabetta GA; Hoover DR (1994)  
 Maternal vitamin A deficiency and mother-to-child transmission of HIV-1  
*Lancet.* 343(8913): 1593-7
- Seshadri C.V. (1993)  
 Large scale nutritional supplementation with spirulina alga.  
 All India Coordinated Project on Spirulina. Shri Amm Murugappa Chettiar Research Center (MCRC)  
 Madras, India.
- Seshadri C.V., Umesh B.V. et Manoharan R. (1991)  
 Beta-carotene studies in Spirulina  
 Society of Applied Algology. International conference No5, vol. 38, no 2-3, pp. 111-113

- Shankar A.H., Prasad A.S. (1998)  
Zinc and immune function: the biological basis of altered resistance to infection  
Am J Clin Nutr. Vol 68, 447-463
- Shey Wiysonge CU., Brocklehurst P and Sterne JAC (2003)  
Vitamin A supplementation for reducing the risk of mother-to-child transmission of HIV infection  
(Cochrane Review)  
The Cochrane Library, issue 1 (Oxford)
- Simpore J., Kabore F., Zongo F., Dansou D., Bere A., Pignatelli S., Biondi DM., Ruberto G. and Musumeci S. (2006)  
Nutrition rehabilitation of undernourished children utilizing Spiruline and Misola  
Nutr J. 5: 3.
- Simpore J., Zongo F., Kabore F., Dansou D., Bere A., Nikiema JB., Pignatelli S., Biondi D., Ruberto G. et Musumeci S. (2005)  
Nutrition Rehabilitation of HIV-Infected and HIV-Negative Undernourished Children Utilizing Spirulina  
Ann Nutr Metab 49:373–380
- Singh Y., Kumar H.D. (1994)  
Adaptation of a strain of Spirulina platensis to grow in cobalt- and iodine-enriched media  
J-Appl-Bacteriol.76(2): 149-54
- Sisso B. (2001)  
Saveurs et vertus de la spiruline  
Mamaeditions.com, 117 Bd Voltaire (Paris)
- Soeder C.J., Muller Wecker H., Pabst W. et Kraut H. (1970)  
Bases de travail pour l'emploi de microalgues dans l'alimentation et dans la diététique  
Ann. Hyg. L. Fr. Med. et Nut. 1970. T.6, No 4, p. 49-56.
- Solisio C, Lodi A, Torre P, Converti A, Del Borghi M. (2006)  
Copper removal by dry and re-hydrated biomass of Spirulina platensis.  
Bioresour Technol. 97(14):1756-60.
- Sorto M. (2003)  
Utilisation et consommation de la spiruline au Tchad  
2ème Atelier International Food-based approaches for a healthy nutrition, Ouagadougou, 23-28/11/2003
- Stewart EM., Moore S., Graham W., McRoberts W., Hamilton J. (2000)  
2-Alkylcyclobutanones as markers for the detection of irradiated mango, papaya, Camembert cheese and salmon meat  
Journal of the Science of Food and Agriculture Vol. 80, Issue 1 , Pages 121 - 130
- Takeuchi T., et al. (1978)  
Clinical experiences of administration of spirulina to patients with hypochromic anemia  
Tokyo Medical and Dental Univ.1978, Japan.
- Tang G., Qin J., Dolnikowski GG., Russell RM. (2000)  
Vitamin A equivalence of beta-carotene in a woman as determined by a stable isotope reference method.  
Eur J Nutr. 39(1):7-11.

- Todd-Lorenz R., (1999)  
Spirulina Pacifica as a Source of Cobalamin Vitamin B-12  
Spirulina Pacifica Technical Bulletin #052
- Tontisirin K., Nantel G. and Bhattacharjee L.(2002)  
Food-based strategies to meet the challenges of micronutrient malnutrition in the developing world  
Proceedings of the Nutrition Society 61, 243–250
- Tranquille N, Emeis JJ, de Chambure D, Binot R, Tamponnet C. (1994)  
Spirulina acceptability trials in rats. A study for the "MELISSA" life-support system.  
Adv Space Res.14(11):167-70
- Trzebiatowska J, Lipok J, Zastawniak K, Mlynarz P and P. Kafarski (2004)  
Glyphosate degradation by Spirulina sp.  
[www.rhodia.com/icpc2004/Abstracts/Thursday/PS%202-031.pdf](http://www.rhodia.com/icpc2004/Abstracts/Thursday/PS%202-031.pdf)
- Tulliez J, Bories G, Février C et Boudène C. (1975)  
Les hydrocarbures des algues spirulines: nature, étude du devenir de l'heptadécane chez le rat et le porc  
Ann. Nutr. Aliment. 29, 563-571.
- Vannela R., Verma SK (2006)  
Co<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, and Zn<sup>2+</sup> Accumulation by cyanobacterium Spirulina platensis  
Biotechnol Prog 22(5):1282-93
- Van Rijn J. and Shilo M. (1986)  
Nitrogen Limitation in Natural Populations of Cyanobacteria (Spirulina and Oscillatoria spp.) and Its Effect on Macromolecular Synthesis  
Appl Environ Microbiol. 52(2): 340-344
- Varga, L; Szigeti, J; Oerdoeg, V (1999)  
Effect of a Spirulina platensis biomass and that of its active components on single strains of dairy starter cultures  
Milchwissenschaft Vol. 54, no. 4, pp. 187-190.
- Varga L., Szigeti J., Kovacs R., Foldes T et Buti S. (2002)  
Influence of a spirulina platensis biomass on the microflora of fermented ABT milks during storage  
J Dairy Sci. 85(5):1031-8
- Vermorel M., Toullec G., Dumond D. et Pion R. (1975).  
Valeur énergétique et protéique des algues bleues spirulines supplémentées en acides aminés: utilisation digestive et métabolique par le rat en croissance  
Ann. Nutr. Aliment. 29, 535-552.
- Vincenzini M, Sili C, Philippis R, Ena A and Materassi R. (1990)  
Occurrence of poly-beta-hydroxybutyrate in Spirulina species  
J Bacteriol. 172(5): 2791-2792
- Watanabe F, Katsura H, Takenaka S, Fujita T, Abe K, Tamura Y, Nakatsuka T, Nakano Y. (1999)  
Pseudovitamin B(12) is the predominant cobamide of an algal health food, spirulina tablets.  
J Agric Food Chem. 47(11):4736-41.



- Watanabe F, Takenaka S, Kittaka-Katsura H, Ebara S, Miyamoto E. (2002)  
Characterization and bioavailability of vitamin B12-compounds from edible algae.  
J Nutr Sci Vitaminol (Tokyo). 48(5):325-31.
- WHO (1973).  
Energy and Protein Requirement.  
World Health Organization. Techn. Rep. Ser.,No 522, Geneva.
- WHO (1998)  
Apports de sécurité en vitamine A pendant la grossesse et l'allaitement  
Série sur les micronutriments, WHO/NUT/98.4
- WHO (2004)  
Vitamin and mineral requirements in human nutrition  
Second edition. World Health Organization and Food and Agriculture Organization of the United Nations
- Wu J.F et Pond W.G. (1981).  
Amino Acid Composition of Spirulina Maxima, a Blue-Green Alga, Grown on the Effluent of Different Fermented Animal Wastes  
Bull. Environm. Contam. Toxicol. 27, 151-159.
- Xue C., Hu Y., Saito H., Zhang Z., Li Z., Cai Y., Ou C., Lin H., Imbs AB. (2002)  
Molecular species composition of glycolipids from Spirulina platensis  
Food Chemistry 77, 9–13
- Yang HN, Lee EH, Kim HM. (1997)  
Spirulina platensis inhibits anaphylactic reaction.  
Life Sci. 61(13):1237-44.
- Yonghuan, W. (1994)  
The study on curative effect of zinc containing spirulina for zinc deficient children  
Capital Medical College, Beijing, China.
- Zhang Cheng-Wu, et al. (1994)  
Effects of polysaccharide and phycocyanin from spirulina on peripheral blood and hematopoietic system of bone marrow in mice  
Proc. of Second Asia Pacific Conf. on Algal Biotech. Univ. of Malaysia.