

UNIVERSITE DE FRANCHE-COMTE
FACUTE DE MEDECINE ET DE PHARMACIE DE BESANCON
PLACE SAINT-JACQUES – 25030 BESANCON CEDEX – TELECOPIE : 03.81.66.55.29

ANNEE 2008 – N° 25. 08. 15

LA SPIRULINE

BILAN ET PERSPECTIVES

THESE

Présentée et soutenue publiquement
le : 13 mai 2008
Pour obtenir le Diplôme d'état de

DOCTEUR EN PHARMACIE

PAR

Hélène CRUCHOT

Née le 25 mars 1971 à Dole (39)

Directeur de Thèse : **J.P. DASPET** Maître de Conférences

Jury de la Thèse :

Président :

L. NICOD Maître de Conférences

Juges :

B. HOEN Professeur
J.P. DASPET Maître de Conférences
M.C. GAUTHEROT Pharmacien

UNIVERSITE DE FRANCHE-COMTE
FACULTE DE MEDECINE ET DE PHARMACIE DE BESANÇON

DOYEN

Professeur Hugues BITTARD

ASSESEURS MEDECINE

Professeur Daniel **SECHTER**
Professeur Xavier **PIVOT**
Professeur Patrick **GARBUIO**
Professeur Emmanuel **SAMAIN**
Professeur Daniel **WENDLING**
Professeur Hatem **BOULAHDOUR**

ASSESEURS PHARMACIE

Professeur Yves **GUILLAUME**
Professeur M-Christine **WORONOFF-LEMSI**
Professeur Estelle **SEILLES**

CHEF DES SERVICES ADMINISTRATIFS

Mme Sandrine **BOQUESTAL**

MEDECINE

PROFESSEURS

M. Hubert	ALLEMAND	EPIDEMIOLOGIE, ECONOMIE DE LA SANTE ET PREVENTION
M. Didier	AUBERT	CHIRURGIE INFANTILE
M. François	AUBIN	DERMATOLOGIE
M. Jean-Pierre	BASSAND	CARDIOLOGIE ET MALADIES VASCULAIRES
Mme Yvette	BERNARD	CARDIOLOGIE ET MALADIES VASCULAIRES
M. Hugues	BITTARD	UROLOGIE
M. Paul	BIZOUARD	PEDOPSYCHIATRIE
Mme Annie	BOILLOT	ANESTHESIOLOGIE ET REANIMATION CHIRURGICALE
M. Jean-François	BONNEVILLE	RADIOLOGIE ET IMAGERIE MEDICALE
M. Jean-François	BOSSET	RADIOTHERAPIE
M. Hatem	BOULAHDOUR	BIOPHYSIQUE ET MEDECINE NUCLEAIRE
M. Jean-Luc	BRESSON	BIOLOGIE DU DEVELOPPEMENT ET DE LA REPRODUCTION
M. Gabriel	CAMELOT	CHIRURGIE VASCULAIRE
M. Gilles	CAPELLIER	REANIMATION MEDICALE
M. Franck	CARBONNEL	GASTROENTEROLOGIE
M. Jean-Claude	CARDOT	BIOPHYSIQUE ET MEDECINE NUCLEAIRE
M. Jean-Marc	CHALOPIN	NEPHROLOGIE
M. Jean-Claude	CHOBAUT	OTO-RHINO-LARYNGOLOGIE
M. Sidney	CHOCRON	CHIRURGIE THORACIQUE ET CARDIOVASCULAIRE
M. Jean-Luc	CHOPARD	MÉDECINE LÉGALE
M. Joël	COMBE	CHIRURGIE VASCULAIRE
M. Alain	CZORNY	NEUROCHIRURGIE
M. Jean-Charles	DALPHIN	PNEUMOLOGIE
M. Benoît	DE BILLY	CHIRURGIE INFANTILE

M	Eric	DECONINCK	HEMATOLOGIE
M.	Bernard	DELBOSC	OPHTALMOLOGIE
M.	Alain	DEPIERRE	PNEUMOLOGIE
M.	Vincent	DI MARTINO	GASTRO-ENTEROLOGIE
M	François	DUMEL	MÉDECINE GENERALE (Professeur associé)
M.	Gilles	DUMOULIN	PHYSIOLOGIE
M.	Jean-Louis	DUPOND	MEDECINE INTERNE
M.	Joseph	ETIEVENT	CHIRURGIE THORACIQUE ET CARDIOVASCULAIRE
M.	Dominique	FELLMANN	HISTOLOGIE ET CYTOLOGIE
M	Patrick	GARBUIO	CHIRURGIE ORTHOPEDIQUE ET TRAUMATOLOGIQUE
M.	Jean – Pierre	GAUME	MEDECINE GENERALE (Professeur associé)
M.	Georges	HERBEIN	VIROLOGIE
M.	Patrick	HERVÉ	HÉMATOLOGIE
M.	Bruno	HEYD	CHIRURGIE GÉNÉRALE
M.	Bruno	HOEN	MALADIES INFECTIEUSES
M.	Philippe	HUMBERT	DERMATO-VENEREOLOGIE
Mme	Bernadette	KANTELIP	ANATOMIE ET CYTOLOGIE PATHOLOGIQUES
M.	Jean-Pierre	KANTELIP	PHARMACOLOGIE FONDAMENTALE
M.	Bruno	KASTLER	RADIOLOGIE ET IMAGERIE MEDICALE
Mme	Nadine	MAGY-BERTRAND	MEDECINE INTERNE
M.	Robert	MAILLET	GYNECOLOGIE ET OBSTETRIQUE
M.	Georges	MANTION	CHIRURGIE GÉNÉRALE
M.	Jacques	MASSOL	THERAPEUTIQUE
M.	Alain	MENGET	PEDIATRIE
M.	Jean-Philippe	MIGUET	HEPATOLOGIE
M.	Guy	MONNIER	ANATOMIE
M.	Michel	MONTARD	OPHTALMOLOGIE
Mme	Christiane	MOUGIN	BIOLOGIE CELLULAIRE
M.	Thierry	MOULIN	NEUROLOGIE
M.	Georges	NARBONI	ENDOCRINOLOGIE ET MALADIES METABOLIQUES
M	Laurent	OBERT	CHIRURGIE ORTHOPEDIQUE ET TRAUMATOLOGIQUE
M.	Bernard	PARRATTE	ANATOMIE
M.	Alfred	PENFORNIS	ENDOCRINOLOGIE, DIABETE ET MALADIES METABOLIQUES
M.	Renaud	PIARROUX	PARASITOLOGIE ET MYCOLOGIE
M.	Xavier	PIVOT	CANCEROLOGIE
M.	Patrick	PLESIAT	BACTERIOLOGIE, VIROLOGIE
M.	Jacques	REGNARD	PHYSIOLOGIE
M.	Bernard	RICBOURG	STOMATOLOGIE ET CHIRURGIE MAXILLO-FACIALE
M	Didier	RIETHMULLER	GYNECOLOGIE-OBSTETRIQUE
M	Pierre	ROHRLICH	PEDIATRIE
M.	Christophe	ROUX	BIOLOGIE DU DEVELOPPEMENT ET DE LA REPRODUCTION
M.	Lucien	RUMBACH	NEUROLOGIE
M.	Yves	SAINT-HILLIER	NEPHROLOGIE
M	Emmanuel	SAMAIN	ANESTHESIOLOGIE ET REANIMATION CHIRURGICALE
M.	François	SCHIELE	CARDIOLOGIE ET MALADIES VASCULAIRES
M.	Daniel	SECHTER	PSYCHIATRIE D'ADULTES
M	Laurent	TATU	ANATOMIE

M.	Pierre	TIBERGHIE	IMMUNOLOGIE
M.	Yves	TROPET	CHIRURGIE PLASTIQUE, RECONSTRUCTIVE ET ESTHETIQUE
M.	Pierre	VANDEL	PSYCHIATRIE ADULTES
M.	Jean-François	VIEL	BIostatISTIQUES ET INFORMATIQUE MEDICALE
M.	Daniel	WENDLING	RHUMATOLOGIE
Mme	Virginie	WESTEEL-KAULEK	PNEUMOLOGIE

PROFESSEURS ÉMERITES

MME	Dominique	VUITTON	IMMUNOLOGIE
-----	-----------	----------------	--------------------

MAITRES DE CONFERENCES

Mme	Clotilde	AMIOT	CYTOLOGIE ET HISTOLOGIE
Mme	Martine	BENEDINI	BIOCHIMIE ET BIOLOGIE MOLECULAIRE
Mme	Véronique	BONNIAUD	MEDECINE PHYSIQUE & READAPTATION
M.	Christophe	BORG	CANCEROLOGIE
Mme	Malika	BOUHADDI	PHYSIOLOGIE
Mlle	Marie-Claire	CLAVEQUIN	HISTOLOGIE ET CYTOLOGIE
M.	Alain	COAQUETTE	VIROLOGIE
M.	Benoît	CYPRIANI	BIOCHIMIE ET BIOLOGIE MOLECULAIRE
M.	Siamak	DAVANI	PHARMACOLOGIE
M	Eric	DELABROUSSE	RADIOLOGIE
M.	Alain	DEVEVEY	PSYCHOLOGIE
M.	François	DUMEL	MEDECINE GENERALE (MC associé)
Mme	Françoise	GAYET	MEDECINE GENERALE (MC associé)
M.	Emmanuel	HAFFEN	PSYCHIATRIE ADULTES
M.	Didier	HOCQUET	BACTERIOLOGIE
M	François	KLEINCLAUSS	UROLOGIE
M.	Daniel	LEPAGE	ANATOMIE
M	Frédéric	MAUNY	BIostatISTIQUES
Mme	Laurence	MILLON	PARASITOLOGIE
Mme	Elisabeth	MONNET	EPIDEMIOLOGIE, ECONOMIE DE LA SANTE ET PREVENTION
M.	Christian	MOUSSARD	BIOCHIMIE ET BIOLOGIE MOLECULAIRE
M	Patrice	MURET	PHARMACOLOGIE
M.	Uyen	NGUYEN NHU	PHYSIOLOGIE
M	Sébastien	PILI-FLOURY	ANESTHESIOLOGIE & REANIMATION CHIRURGICALE
M	Jean-Luc	PRETET	BIOLOGIE CELLULAIRE
Mme	Evelyne	RACADOT	HEMATOLOGIE
Mme	Elisabeth	RANFAING	ANATOMIE ET CYTOLOGIE PATHOLOGIQUES
M.	Daniel	TALON	BACTERIOLOGIE, HYGIENE
Mme	Isabelle	THAON	MEDECINE ET SANTE AU TRAVAIL
M.	Fabrice	VUILLIER	ANATOMIE
M.	Jean-Pierre	WOLF	PHYSIOLOGIE

PHARMACIE

PROFESSEURS

M. Michel	BAUD	BIOPHYSIQUE ET INFORMATIQUE
M. Alain	BERTHELOT	PHYSIOLOGIE
Mme Françoise	BEVALOT	PHARMACOGNOSIE
M. Yves	GUILLAUME	CHIMIE ANALYTIQUE
M. Alf	LAMPRECHT	GALENIQUE
M. Samuel	LIMAT	PHARMACIE CLINIQUE
M. Dominique	MEILLET	PARASITOLOGIE – MYCOLOGIE (BACTERIOLOGIE)
Mme Mariette	MERCIER	BIOMATHEMATIQUES ET BIOSTATISTIQUES
Mme Lysiane	RICHERT	TOXICOLOGIE
M. Bernard	REFOUVELET	CHIMIE PHYSIQUE ET CHIMIE MINERALE
M. Philippe	SAAS	IMMUNOLOGIE
Mme Estelle	SEILLES	IMMUNOLOGIE (VIROLOGIE)
Mme Marie-Christine	WORONOFF-LEMSI	PHARMACIE CLINIQUE
M. Alain	XICLUNA	CHIMIE ORGANIQUE, CHIMIE THERAPEUTIQUE

MAITRES DE CONFERENCES

M. Laurent	BERMONT	BIOCHIMIE
M. Oleg	BLAGOSKLONOV	BIOPHYSIQUE ET IMAGERIE MEDICALE
Mme Oxana	BLAGOSKLONOV	GENETIQUE
M. Eric	CAVALLI	CHIMIE PHYSIQUE ET MINERALE
M. Jean-Patrick	DASPET	BIOPHYSIQUE ET INFORMATIQUE
Mlle Claire	ANDRE	CHIMIE ANALYTIQUE
Mme Céline	DEMOUGEOT	PHARMACOLOGIE
Mme Sylvie	DEVAUX	PHYSIOLOGIE
Mme Francine	GARNACHE-OTTOU	HEMATOLOGIE
Mme Corinne	GIRARD	PHARMACOGNOSIE
M. Lhassanne	ISMAILI	CHIMIE ORGANIQUE
Mme Isabelle	LASCOMBE	BIOLOGIE CELLULAIRE
M. Safwat	MAKKI	PHARMACIE GALENIQUE
Mme Carole	MIGUET ALFONSI	TOXICOLOGIE
M. Jean-Louis	MOZER	BIOCHIMIE
M. Frédéric	MUYARD	PHARMACOGNOSIE
Mme Laurence	NICOD	BIOLOGIE CELLULAIRE
M. Yann	PELLEQUER	PHARMACIE GALENIQUE
Mme Nathalie	RETEL	BIOMATHEMATIQUES ET BIOSTATISTIQUES
Mme Marianne	SANDOZ	PHARMACODYNAMIE
M. Tong	TRUONG THANH	CHIMIE ANALYTIQUE

PROFESSEUR AGREGE DU SECOND DEGRE, PROFESSEURS ASSOCIES A TEMPS PARTIEL

M. Patrice	BLEMONT	DROIT
MME Sandra	CHAVIN	ANGLAIS
MME Frédérique	ROUSSEY	ANGLAIS

A Notre Président de Thèse,

Madame Laurence NICOD,

Maître de Conférences de Biologie cellulaire,

Vous nous avez fait le grand honneur
d'accepter la présidence de cette thèse.

Veillez trouver ici nos sincères
remerciements et l'expression de notre
respectueuse reconnaissance.

A Notre Directeur de Thèse et Juge,

Monsieur Jean-Patrick DASPET,

Maître de Conférences de biophysique et informatique,

Vous nous avez fait l'honneur
d'accepter de suivre la réalisation de
cette thèse.

Vous nous avez offert un sujet à la fois
original et très riche. Nous avons
apprécié votre gentillesse et votre
disponibilité.

Veillez trouver dans ce travail
l'expression de nos sincères
remerciements.

A Notre Juge,

Monsieur le Professeur Bruno HOEN,

Service des Maladies Infectieuses et Tropicales au CHU de Besançon,

Vous nous avez fait l'honneur de juger
notre travail.

Veillez trouver dans ce travail
l'expression de notre respectueuse
reconnaissance.

A Notre Juge,

Madame Marie-Claire GAUTHEROT,

Pharmacien titulaire,

Vous nous avez fait l'honneur d'accepter de
juger notre travail.

Veillez trouver ici l'expression de nos
remerciements les plus sincères.

A mes parents,

Pour leur confiance, leur amour, leur présence et leur soutien dans les épreuves que la vie nous a réservées.

Qu'ils trouvent dans cette thèse le témoignage de ma profonde reconnaissance et de l'amour que j'ai pour eux.

A Arnaud,

Dix ans après ton « départ », ton absence est toujours douloureuse à supporter. Tu m'as insufflé une force et un courage qui m'ont permis de reprendre mes études et d'être là aujourd'hui.

Je te dédie cette thèse.

A tous les membres de ma famille,

Vivants ou disparus, je vous dédie cette thèse.

A mes amis,

Gabriëla, Laurent et Martine, François, Daniel et Geneviève, Lauren, Aurélie, Marlène, Lulu, Céline, Adeline

Merci pour votre soutien, votre présence et votre amitié.

A toute l'équipe de la Pharmacie de Devecey,

Merci pour votre accueil chaleureux, votre gentillesse et vos précieux conseils.
Merci pour le temps que vous me consacrez et pour les connaissances pratiques que vous m'apportez.
C'est un immense plaisir de travailler en votre compagnie.

SOMMAIRE

LISTE DES ABREVIATIONS

INTRODUCTION

PREMIERE PARTIE : Présentation de la spiruline

1. La spiruline : généralités

- 1.1 Caractéristiques structurales
- 1.2 Croissance
- 1.3 Ecologie
- 1.4 Reproduction
- 1.5 Déplacement

2. La spiruline : de sa naissance à nos jours

3. Aspects nutritionnels

- 3.1 Analyse nutritionnelle qualitative et quantitative
- 3.2 Synthèse des apports quantitatifs de la spiruline, en regard des apports recommandés
- 3.3 Préservation des nutriments et micro-nutriments jusqu'à la consommation
- 3.4 Tolérance et acceptabilité alimentaire

4. Différents moyens d'obtenir de la spiruline

- 4.1 Exploitation des ressources naturelles
- 4.2 Cultures familiale et artisanale
- 4.3 Culture industrielle
- 4.4 Production en photobioréacteurs

DEUXIEME PARTIE : La spiruline dans les pays industrialisés

1. Différents secteurs d'activité utilisant la spiruline

- 1.1 Industrie agroalimentaire
- 1.2 Industrie cosmétique
- 1.3 Médecine
- 1.4 Environnement
- 1.5 Recherche spatiale

2. Tour d'horizon des éventuelles propriétés thérapeutiques de la spiruline, d'après les résultats des recherches cliniques menées et publiées
 - 2.1. Activité antioxydante et antiradicalaire
 - 2.2. Effets sur le système immunitaire
 - 2.3. Activité détoxifiante et protectrice de certains organes
 - 2.4. Action anti-inflammatoire
 - 2.5. Effets radio protecteurs
 - 2.6. Effets stimulants sur la lignée érythrocytaire
 - 2.7. Effets sur l'hyperlipidémie, le diabète et l'hypertension artérielle
 - 2.8. Effets sur la flore intestinale
 - 2.9. Effets dans le cadre d'une déficience chronique en vitamine A

TROISIEME PARTIE : La spiruline dans les pays en voie de développement

1. Quelques définitions et données épidémiologiques autour de la malnutrition
 - 1.1 La malnutrition
 - 1.2 Le kwashiorkor
 - 1.3 Le marasme
 - 1.4 Le kwashiorkor marasmique
 - 1.5 Données épidémiologiques
2. Causes de la malnutrition dans les pays du tiers-monde
 - 2.1 Insécurité alimentaire des ménages
 - 2.2 Insuffisance des services de santé et d'assainissement
 - 2.3 Mauvaise qualité des soins apportés aux enfants et aux femmes
3. Manifestations cliniques et biologiques de la malnutrition
 - 3.1 Aspects cliniques
 - 3.2 Anomalies biologiques
4. Evolution et pronostic
5. Conséquences de la malnutrition à plus ou moins long terme
6. En quoi la spiruline représente-t-elle un espoir dans le combat contre la malnutrition ?

- 6.1 Réhabilitation nutritionnelle avec la spiruline au Burkina Faso
 - 6.2 Evaluation de l'efficacité de la supplémentation en spiruline auprès d'enfants atteints de malnutrition sévère, au Niger
 - 6.3 Essai de réhabilitation nutritionnelle au Sénégal
 - 6.4 Etude sur les bénéfices nutritionnels de la spiruline, réalisée en Inde du sud
 - 6.5 Etude menée en Chine
 - 6.6 Etudes menées au Zaïre
 - 6.7 Etude menée au Togo
 - 6.8 Etude menée au Vietnam
7. Problèmes rencontrés par les initiateurs de projets d'exploitation de spiruline dans ces pays
 - 7.1 Première difficulté majeure : la maîtrise de la culture
 - 7.2 Deuxième difficulté majeure : la formation du personnel local
 - 7.3 Troisième difficulté majeure : la pérennité de l'exploitation
 - 7.4 Quatrième difficulté majeure : le contexte économique mondial
8. Conseils pour faciliter la réussite d'un projet d'exploitation de la spiruline sur du long terme
 - 8.1 Choix des partenaires
 - 8.2 Mission préparatoire
 - 8.3 Rédaction et signature d'une convention de projet
 - 8.4 Etude d'avant-projet
 - 8.5 Recherche de fonds
 - 8.6 Etude technique détaillée
 - 8.7 Construction
 - 8.8 Formation du personnel et démarrage de la culture
 - 8.9 Suivi de l'exploitation, circuits humanitaires et commerciaux
9. Principales associations intégrant dans leurs projets, la culture de spiruline dans les PVD
 - 9.1 Antenna Technologies
 - 9.2 TECHNAP
 - 9.3 CODEGAZ
 - 9.4 Targuinca
 - 9.5 CREDESA
 - 9.6 OCADES
 - 9.7 ALCMK

10. Exemples de productions locales de spiruline

10.1 En Afrique

10.2 En Asie

10.3 En Amérique du sud

CONCLUSION

ANNEXES

BIBLIOGRAPHIE

TABLE DES MATIERES

LISTE DES ABREVIATIONS

AAPH : 2,2'-azobis dihydroxychloride
ACMA : Association pour Combattre la Malnutrition par l'Algoculture
ADN : Acide Désoxyribonucléique
AJR : Apports Journaliers Recommandés
ALCMK : Association de Lutte Contre la Malnutrition au Kanem
AMT : Apport Maximal Tolérable
ANR : Apport Nutritionnel Recommandé
ARDA : Amplified Ribosomal DNA Restriction Analysis
ARN : Acide Ribonucléique
AS : Apport Suffisant
ASE : Agence Spatiale Européenne
ATA : Antenna Technologies Antsirabé
ATF : Antenna Technologies France
ATP : Adénosine Triphosphate
Ca – SP : Calcium Spirulan
CEPAZE : Centre d'Echange et Promotion des Artisans en Zones à Equiper
CEVA : Centre d'Etude et de Valorisation des Algues
CFC : Chloro-Fluoro-Carbure
CFPPA : Centre de Formation Professionnelle et de Promotion Agricole
CHU : Centre Hospitalier Universitaire
CMSC : Centre Médical St Camille
CMV : Cytomégalovirus
COX : Cyclooxygénase
CREDESA : Centre Régional pour le Développement et la Santé
CREN : Centre de Renutrition et d'Education Nutritionnelle
CRP : Protéine C réactive
DER : Dépense Energétique de Repos
DHA : Acide Docosahexaénoïque
DIC : Dainippon Ink Chémicals
DS : Dextrane Sulfate
EAR : Equivalents d'Activité du Rétinol
EDTA : acide Ethylène Diamine-Tétra- Acétique
ELISA : Enzyme-Linked Immunosorbent Assay
EPA : Acide Eicosapentaénoïque
EPO : Erythropoïétine
EPS : Exo Polysaccharide sulfaté
ET : Ecart Type
EVA : Etendue des Valeurs Acceptables
FAO : Food and Agricultural Organization
F CFA : Franc de Coopération Financière en Afrique
FDA : Food and Drug Administration
FMI : Fonds Monétaire International
GERES : Groupe Energies Renouvelables, Environnement et Solidarité
GES : Gaz à Effet de Serre
GLA : Acide gamma- linoléinique
GMP : Good Manufacturing Practice
GRAS : Generally Recognized As Safe

HACCP : Hazard Analysis Critical Control Point
HDL : High Density Lipoprotein
HSV : Herpès Simplex Virus
IC (50) : Concentration d'un produit permettant un Inhibition de 50 % de l'activité enzymatique ou oxydante
IFP : Institut Français du Pétrole
IHSM : Institut Halieutique et des Sciences Marines
IL : Interleukine
IMC : Indice de Masse Corporelle
IRD : Institut de Recherche pour le Développement
LDL : Low Density Lipoprotein
MELISSA : Micro Ecological Life Support System Alternative
MIT : Massachussetts Institute of Technology
MPE : Malnutrition Protéino-Energétique
NADP : Nicotinamide Adénine Dinucléotide Phosphate
NASA : National Aeronautics and Space Administration
NCHS : National Center for Health Statistics
NFS : Numération Formule Sanguine
NK : Natural Killer (Cells)
NOS : Nitrite Oxyde Synthétase
OCADES : Organisation Catholique pour le Développement et la Solidarité
OMC : Organisation Mondiale du Commerce
ONG : Organisation Non Gouvernementale
ONU : Organisation des Nations Unies
ORL : Otorhinolaryngologie
OTEC : Ocean Thermal Energy Conversion
PAS : Plans d'Ajustements Structurels
PASS : Producteurs Associés de Spiruline du Sud
PIB : Produit Intérieur Brut
PGE₂ : Prostaglandine E₂
PLA₂ : Phospholipase A₂
PNUD : Programme des Nations Unies pour le Développement
ppm : partie par million
PS : Photosystème
PVC : Polychlorure de Vinyle
PVD : Pays en Voie de Développement
QI : Quotient Intellectuel
SIDA : Syndrome d'Immunodéficience Acquis
SMA : Sommet Mondial de l'Alimentation
SOD : Superoxyde Dismutase
TBARS : Taux des substances réagissant avec l'acide thiobarbiturique
TECHNAP : Technologies Appropriées (en faveur des PVD)
TNF : Tumor Necrosis Factor
UNICEF : Fond des Nations Unies pour l'Enfance
UV : Ultraviolet
VIH : Virus de l'Immunodéficience Humaine

Introduction

Qu'ont en commun un Aztèque, un enfant africain malnutri et un astronaute en mission dans l'espace ? La réponse est : la spiruline. Le premier l'a consommée dans le passé, le second est susceptible d'en consommer actuellement et le troisième sera sans doute amené à le faire dans un futur proche.

A mi-chemin entre le règne végétal et le règne animal, la spiruline est un micro-organisme appartenant à la classe des cyanobactéries. Elle croît dans des eaux alcalines, chaudes et salées et possède des qualités nutritives exceptionnelles.

Entre le XVI^{ème} siècle, où on sait qu'elle était consommée par les populations aztèques, et aujourd'hui, la spiruline a plusieurs fois suscité l'intérêt avant de retomber dans l'oubli.

L'objet de ce travail a consisté à réaliser une étude bibliographique sur la spiruline, présentée dans ce manuscrit en trois parties principales.

La première partie présente la spiruline : ses caractéristiques (physiques, biologiques et écologiques), son histoire, sa composition nutritionnelle qualitative et quantitative et les différentes techniques de culture existant actuellement à travers le monde. Les questions concernant son acceptabilité, les différents modes de consommation et les risques de toxicité seront également traitées.

Les deux parties suivantes mettent en parallèle la vision de la spiruline, qu'ont les pays industrialisés et émergents, par rapport à celle qu'ont les pays en voie de développement.

Ainsi, la deuxième partie relate son approche par les pays industrialisés : les différents domaines dans lesquels elle est utilisée puis les études cliniques les plus pertinentes publiées au sujet de ses propriétés thérapeutiques éventuelles.

La troisième partie reflète ce que représente la spiruline pour les pays en voie de développement. Dans un premier temps, nous définirons la notion de malnutrition protéino-énergétique et nous préciserons quelques données épidémiologiques. Ensuite, nous décrirons les manifestations cliniques et biologiques de la malnutrition, ses causes et ses conséquences à plus ou moins long terme. Enfin, nous exposerons les intérêts de la spiruline dans la lutte contre ce fléau, en rapportant les résultats de plusieurs études réalisées sur des enfants malnutris.

Nous nous attarderons également sur les difficultés rencontrées lors des projets d'exploitation de la spiruline dans ces pays, avant d'exposer quelques conseils pour favoriser leur pérennité. Nous terminerons par la présentation des principales organisations non gouvernementales impliquées dans ce type de projet et nous verrons quelques exemples d'exploitations, principalement en Afrique, mais aussi en Inde et au Chili.

Première partie

Présentation de la spiruline

1. La spiruline : généralités

La spiruline fait partie des micro-organismes : ni végétale ni animale, elle est classée parmi les **cyanobactéries** [1]. Ce groupe comprend l'ensemble des bactéries autotrophes, c'est-à-dire capables d'utiliser l'énergie de la lumière pour la photosynthèse [2].

Mais, contrairement aux algues et aux plantes également dotées de ce pouvoir photosynthétique, elle appartient à l'embranchement des procaryotes, car elle n'a pas de noyau bien individualisé. A noter que cette appartenance à la classe des cyanobactéries est récente. En effet, elle est longtemps restée classée parmi les « algues bleu-vert », ce pour plusieurs raisons :

- son habitat aquatique,
- la présence d'un système photosynthétique producteur d'oxygène,
- son aptitude à développer des biomasses importantes,
- sa morphologie proche de celle des algues,
- sa couleur liée à sa teneur en pigments bleu (phycocyanine) et vert (chlorophylle).

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

La spiruline est la plus connue de toutes ; d'un point de vue taxonomique, elle appartient à l'ordre des *Nostocales*, à la famille des *Oscillatoriaceae* et au genre *Arthrospira* [3][4].

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

En pratique, il faut retenir que le terme "Spiruline" correspond au nom commercial d'une espèce de cyanobactérie alimentaire appartenant toujours au genre *Arthrospira*. Le mot "Spirulina" est le nom commercial anglophone de la spiruline, mais il désigne également un genre de cyanobactérie assez éloigné de *Arthrospira*, et surtout non comestible (par exemple : *Spirulina major*, *Spirulina subtilissima*, *Spirulina princeps*, *Spirulina gigantea* ou *Spirulina subsalsa*) [5].

1.1 Caractéristiques structurales

La spiruline se présente sous la forme d'un filament pluricellulaire bleu-vert, mobile, non ramifié et enroulé en spirale. Ce filament est appelé trichome ; sa forme hélicoïdale, observable uniquement en milieu liquide, est caractéristique du genre. C'est d'ailleurs de là que la spiruline tient son nom.

Par ailleurs, contrairement à certaines autres cyanobactéries (*Anabaena*, *Nostoc*), la spiruline ne possède pas les cellules spécialisées permettant la fixation de l'azote de l'air (hétérocystes).

La longueur moyenne du filament est de 250 μm lorsqu'il a 7 spires et son diamètre est d'environ 10 μm . Mais les paramètres de l'hélice (épaisseur, longueur) ne sont pas toujours les mêmes selon les chercheurs qui étudient la spiruline.

Ainsi, le genre *Arthrospira* a été retrouvé en maints endroits dans le monde et, il a été constaté une grande variation dans la taille et la forme des trichomes (tableau I).

Parfois, les spires au centre du filament sont plus rapprochées qu'aux extrémités et la forme générale peut-être celle d'un diabolo, avec un diamètre de spire plus petit au centre et aux extrémités.

Les scientifiques étudiant la spiruline ont donc d'abord pensé qu'il existait de nombreuses espèces d'*Arthrospira* ; en fait, l'analyse de leurs caractéristiques génétiques, effectuées par Scheldeman et al en 1999, basées sur l'ARDA (Amplified Ribosomal DNA Restriction Analysis) ne fait apparaître que deux espèces presque identiques d'*Arthrospira* [6]. Ils supposent alors que de ces deux espèces dérivent plusieurs souches.

Voici quelques précisions à propos des notions de souches et d'espèces : une espèce est une entité réunissant des êtres vivants présentant un ensemble de caractéristiques morphologiques, anatomiques, physiologiques, biochimiques et génétiques communes. Les espèces sont regroupées en genres et divisées en sous ensembles dénommés souches ou variétés.

Actuellement, 50 souches d'*Arthrospira* recensées à travers le monde ont été étudiées pour en décrire la diversité génétique. C'est l'association Antenna Technologies qui, en collaboration avec l'université de Genève, a récemment effectué ce travail de classification de différentes souches d'*Arthrospira* (figure 3). Celui-ci repose sur le séquençage génétique d'un fragment d'ADN hypervariable, mais spécifique des cyanobactéries. Il en ressort une très forte homogénéité du genre *Arthrospira*, même lorsque les souches ont des morphologies variées ou lorsqu'elles proviennent de lieux géographiques très différents. Leur conclusion est qu'il n'existerait *a priori* que deux espèces génétiquement différentes parmi ces souches [3]. Ces deux espèces sont : *Arthrospira platensis*, initialement originaire du Kanem (Tchad) et *Arthrospira geitleri* ou *maxima*, originaire du Mexique (figure 2) :

- ★ *Spirulina platensis* (figure 1) est la plus connue et la plus utilisée lors des travaux de recherche ou lors de l'ensemencement de nouvelles cultures. Elle se compose de trichomes atteignant 350 μm de long et entre 6 et 12,45 μm de diamètre ; ils sont un peu rétrécis au niveau des articulations. Les tours de spire ont un diamètre de 20 à 50 μm , diminuant légèrement vers les extrémités [5].



Figure 1 : *Spirulina platensis* observée au microscope. © Antenna.ch

- ★ *Spirulina maxima* se caractérise par des trichomes de 70 à 80 μm de long, de 7 à 9 μm de diamètre et légèrement effilés aux extrémités ; ils forment une spirale régulière de 3 à 8 tours et de 40 à 60 μm de diamètre. Les cellules constituant les trichomes mesurent entre 5 à 7 μm de long et ne rétrécissent pas au niveau des articulations [5].



Figure 2 : Filaments des deux espèces de spiruline observés au microscope optique [7]

Tableau 1 : Descriptions de plusieurs variétés d'*Arthrospira platensis*, selon l'endroit où elles poussent naturellement [5]

Date	Auteur et lieu	Longueur des cellules (μm)	Diamètre des cellules (μm)	Diamètre des spires (μm)	Distance entre les spires (μm)
1980	R. Fox Lac Orovilca (Pérou)	2,5	7,8	36	95
1984	S. Pargaonkar Lac Lonar (Inde)	4,5	12	99	55
1990	H. Durand-Chastel Lac Cratère (Mexique)	3,2	12,45	52,3	52
1993	G. Planchon Paracas (Pérou)	2,4	9,5	33	43
1994	G. Planchon Camargue (France)	2,3	11,6	44	109
1994	K. Nguyen Toliara (Madagascar)	3,8	7,2	21,2	32,5
1994	G. Knutsen Olive Mill (Californie)	2,6	6,1	32	65

A noter que la distance entre les spires varie beaucoup selon l'intensité lumineuse : sous éclairage intense, elle peut être réduite à 10 μm alors que sous faible éclairage, elle peut dépasser 100 μm .

En ce qui concerne les différentes souches (ou variétés) de spirulines, on distingue les spirulines "spirales", "ondulées", et "droites" (cf. figure 3).

Le terme "spiralées" désigne les souches dont les filaments ont la forme d'une queue de cochon, telle la "Lonar" (Inde) ; le terme "ondulées" désigne les souches dont les filaments sont en spirale étirée, telle la "Paracas" (Pérou) ; le terme "droites" désigne les souches dont les filaments sont tellement étirés qu'ils donnent l'impression d'être presque rectilignes. Des photographies de ces différentes souches sont présentées dans l'annexe 1 [8].

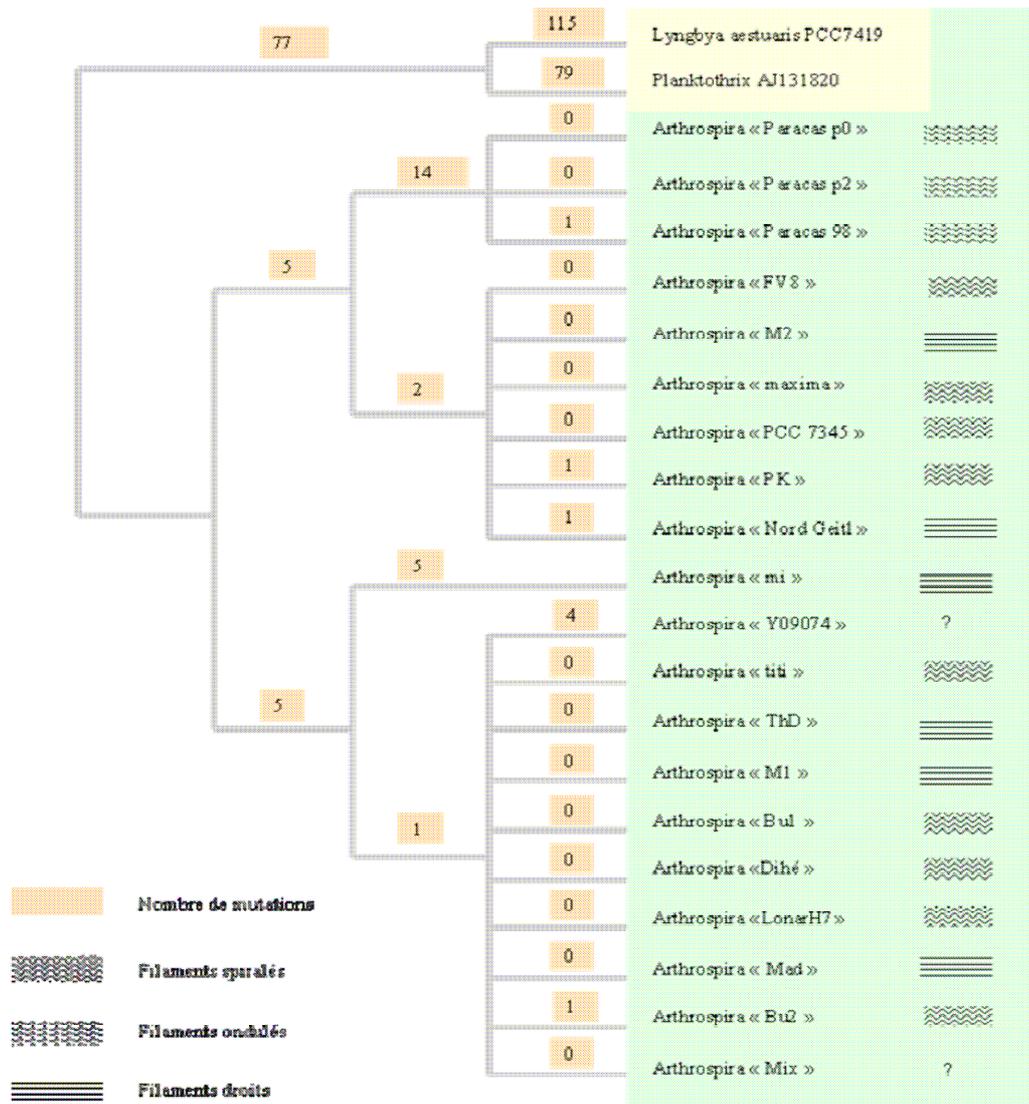


Figure 3 : Classification d'une vingtaine de souches de spirulines (*Arthrospira* sp) d'après la séquence génétique d'un fragment d'ADN comprenant la région située entre deux gènes de phycocyanine (*cpcB-cpcA* spacer) [3]. © Antenna.ch

Sachant que certaines souches initialement spiralées peuvent devenir ondulées ou droites, la question du nombre de variétés de spiruline fait encore débat entre les scientifiques : leur existence est-elle liée à une mutation irréversible de l'une des deux espèces ou à une adaptation transitoire à des conditions de vie différentes ?

Dans le cadre de ce travail, lorsque la spiruline est évoquée en tant que cyanobactérie, il est sous-entendu les spirulines en général, c'est-à-dire l'ensemble des cyanobactéries appartenant au genre *Arthrospira*. D'autre part, sauf mention contraire, la spiruline étudiée dans les expériences de réhabilitation nutritionnelle ou lors de recherches cliniques et scientifiques, est la variété *platensis*.

Les cellules de cyanobactéries n'ayant pas de plastes individualisés, leur coloration est homogène. Cependant, en microscopie optique, on distingue une zone périphérique colorée (= le chromoplasma) et une partie centrale plus claire (= le centroplasma) [9].

La microscopie électronique a aussi permis de mieux connaître la structure et le fonctionnement de ces cellules. Leur organisation est relativement simple et semblable à celle des cellules de procaryotes [1][10] :

- Absence de membrane nucléaire et donc de noyau bien individualisé ;
- Absence de mitochondries, réticulum endoplasmique, appareil de Golgi, et flagelles ;
- Les cellules sont limitées par une fine membrane constituée de 4 couches minces différenciables en microscopie électronique : deux d'entre elles présentent une analogie chimique et structurale avec la paroi des bactéries gram négatif car elles sont riches en mucopolymères et mucopeptides. Elles sont néanmoins un peu plus complexes, mais il est important de retenir que cette membrane est totalement exempte de cellulose. Une enveloppe externe, riche en caroténoïdes, peut parfois l'enrober.
- Sur le plan ultra structural, le chromoplasma apparaît comme un système membranaire comprenant des thylakoïdes ; la spiruline ne renfermant pas de chloroplastes, ce sont ces thylakoïdes qui constituent les sites de photosynthèse. Ce sont des filaments pigmentés disposés généralement de façon pariétale concentrique. Ils renferment les phycobilisomes, granules porteurs des pigments photosynthétiques (chlorophylle a, β -carotène et oxycaroténoïdes, phycocyanine et phycoérythrine).
- Le nucléoplasme (ou centroplasma) correspond d'une part, à des fibrilles d'acide désoxyribonucléique (ADN) représentant le génome (entre 2 et 8×10^9 Daltons) et, d'autre part, à des grains d'acide ribonucléique (ARN).
L'ADN est colorable par les réactifs histologiques classiques (Feulgen, hématoxyline, etc.) et visible au microscope électronique sous forme de fines aiguilles de 250 nm.

Le chromoplasma présente de nombreuses inclusions dont les plus importantes sont [3] :

- les granules de cyanophycine : la cyanophycine, molécule propre aux cyanobactéries, est un polymère d'acide aspartique et d'arginine. Ce polypeptide, non fabriqué par les ribosomes, constitue une forme de réserve d'azote et d'énergie ;

- les carboxysomes : ils contiennent le ribulose-1,5 phosphate carboxylase, responsable de la fixation du CO₂. Cette enzyme n'est présente que dans des conditions de hautes intensités lumineuses et de hautes concentrations en nitrates ;
- les granules d'amidon cyanophycéen (glycogène), d'hydrates de carbone similaires à l'amylopectine et ceux de volutine (polyphosphates) constituent des formes de réserve énergétique ;
- les ribosomes riches en acide ribonucléique ;
- les globules lipidiques ;
- les vésicules de gaz : elles se présentent sous la forme de faisceaux de minuscules cylindres contenant de l'azote. Leur rôle est de réguler la flottabilité des filaments de spiruline.

1.2 Croissance

Grâce à ses pigments chlorophylliens, la spiruline est une espèce photoautotrophe aérobique. Par conséquent, contrairement aux bactéries photoautotrophes anaérobies qui n'ont que le photosystème I, elle est dotée des photosystèmes I et II [11].

Chez la spiruline, la **photosynthèse** constituant la clé de sa croissance, il paraît utile de faire quelques rappels concernant ce processus.

La photosynthèse est un phénomène physiologique d'importance capitale, puisqu'il est indispensable à toute forme de vie animale et humaine. Grâce à ce processus, sous l'action de la lumière, un organisme photosynthétique peut élaborer de la matière organique indispensable à son développement : il le fait à partir d'éléments minéraux, en absorbant le gaz carbonique et l'eau, et en rejetant de l'oxygène.

Pour sa photosynthèse, la spiruline a besoin d'eau, de carbone, et d'éléments nutritifs dont l'azote en particulier. Elle assimile une source de carbone minéral (le CO₂ atmosphérique) et la convertit en énergie biochimiquement utilisable représentée par le glucose. Son point commun avec les autres cyanobactéries est qu'elle ne possède pas le cycle de Krebs complet [5][10].

L'énergie lumineuse est captée par des pigments assimilateurs représentés par les chlorophylles. La chlorophylle de la spiruline et des autres bactéries photosynthétiques se situe dans les régions spécialisées de leur membrane cellulaire : les phycobilisomes des thylakoïdes.

La photosynthèse est divisée en deux phases : une série de réactions dites "lumineuses" et une série de réactions dites "obscurées" [12] :

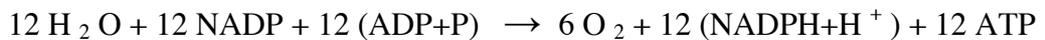
- les **réactions lumineuses** nécessitent la présence de lumière et s'effectuent dans les membranes thylakoïdiennes, pour le cas de la spiruline (dans les chloroplastes pour les cellules végétales). Cette lumière permet d'apporter l'énergie nécessaire à la réaction photosynthétique. Les thylakoïdes contiennent des pigments photosynthétiques organisés en deux photosystèmes : les photosystèmes I et II, respectivement notés PS I et PS II. C'est au niveau des membranes communes à deux thylakoïdes que se trouvent ces deux photosystèmes ; ils sont toujours placés à proximité l'un de l'autre [13].

Le PS I possède une plus grande variété de pigments que le PS II et il est riche en chlorophylle de type a P700 : celle-ci absorbe des longueurs d'onde de 430 nm dans le bleu et de 700 nm dans le rouge. La source d'électrons est constituée par les minéraux et les molécules organiques.

Le PS II est riche en chlorophylle de type a P680. C'est à son niveau que se produit la photolyse de l'eau, c'est-à-dire qu'il récupère les électrons libérés par les molécules d'eau.

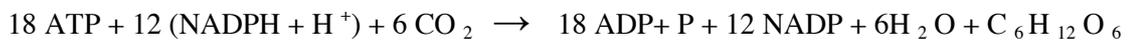
La phycocyanine, pigment spécifique aux cyanobactéries, est essentielle au transport de l'énergie vers le PS II [14].

Au cours de cette phase lumineuse, il y a photolyse de l'eau : les molécules d'oxygène et d'hydrogène se séparent. On assiste également à la synthèse d'ATP (Adénosine triphosphate), molécule dont la consommation libère beaucoup d'énergie, et de NADP (Nicotinamide Adénine Dinucléotide Phosphate) [15].

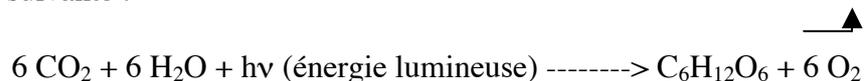


- les **réactions obscures** ont lieu dans le stroma (matrice) du thylakoïde, où l'énergie produite lors de la phase lumineuse y est stockée sous forme d'ATP et de NADP réduit. Cette énergie est utilisée pour la synthèse de molécules organiques, par réduction du dioxyde de carbone.

Cette phase est dite obscure car elle correspond à une série de réactions qui ne nécessitent pas de lumière ; ce n'est pas pour autant qu'elles se déroulent la nuit, au contraire. Ces réactions forment le cycle de Calvin. A l'issue de ce cycle, une molécule de glucose est synthétisée [16].



La formule générale de la photosynthèse peut donc s'écrire de la façon suivante :



Bien que la spiruline ne renferme que de la chlorophylle de type a, il en existe d'autres sortes, en particulier chez d'autres types d'algues : les chlorophylles b, c et d.

Tous les pigments chlorophylliens sont des chromoprotéines dont le groupement prosthétique est une porphyrine hydrophile à quatre noyaux tétrapyrroliques, centrée sur un atome de magnésium ; elle est estérifiée par un alcool à longue chaîne carbonée, le phytol hydrophobe. C'est la nature des substituants des groupements pyrroles qui les différencie sur le plan structural.

Les différences entre les chlorophylles se situent donc au niveau de leur structure moléculaire et de leur longueur d'onde d'absorption des radiations lumineuses. Dans la membrane des thylakoïdes, les granules de chlorophylle sont associées à des protéines, formant ainsi des complexes protéines-pigments.

Voici quelques précisions concernant le rôle des chlorophylles [17] : ce sont des pigments photosynthétiques et, à ce titre, elles peuvent être excitées par les radiations lumineuses.

Cette excitation est due à la présence de liaisons conjuguées (et donc d'électrons délocalisés) : l'arrivée d'un photon fait passer un électron délocalisé d'un état fondamental (non excité) à un état excité. La chlorophylle, une fois excitée, retourne à son état fondamental, plus stable thermodynamiquement. Ceci peut se faire de plusieurs manières, en particulier :

- en émettant de la lumière (c'est la fluorescence constatée dans une solution de chlorophylle) ;
- en transférant son énergie à une molécule très proche (c'est la résonance, qui permet aux pigments de l'antenne collectrice des photosystèmes de transférer l'énergie lumineuse de molécule en molécule jusqu'à une chlorophylle piège) ;
- en perdant un électron (c'est la photochimie, laquelle permet à la molécule de chlorophylle piège du photosystème, de réduire un accepteur d'électron et donc de réaliser la chaîne photosynthétique).

Avant l'apparition des cyanobactéries sur Terre, la photosynthèse était qualifiée de photosynthèse bactérienne primitive [18] ; elle avait deux caractéristiques :

- les pigments qui captaient l'énergie lumineuse (bactéριοchlorophylle) ne formaient qu'un seul photosystème ;
- la source d'électrons était un composé minéral soufré réduit : le SH₂.

Avec l'évolution, lorsque les cyanobactéries sont apparues, la photosynthèse s'est modifiée [19] :

- le donneur d'électrons est devenu l'eau (H₂O) ; elles ont pu dès lors conquérir tous les milieux ;
- l'accepteur final d'électrons est l'oxygène O₂ ; il provient totalement d' H₂O ;
- les deux photosystèmes PS I et PS II sont présents ;
- il existe un couplage entre les réactions photochimiques et la synthèse des glucides.

La nuit, c'est la **respiration** qui permet à la spiruline de produire l'énergie nécessaire à son entretien et à sa croissance. Les hydrates de carbone produits pendant le jour, subissent une oxydation qui les convertit en protéines, avec en parallèle une formation de CO₂ (lequel reste dissous dans le milieu de culture) et d' H₂O [5].

Puis, avec le retour de la lumière du jour, le CO₂ participera à un nouveau cycle de photosynthèse.

Comme le montre la figure 4, la photosynthèse et la respiration s'équilibrent globalement.

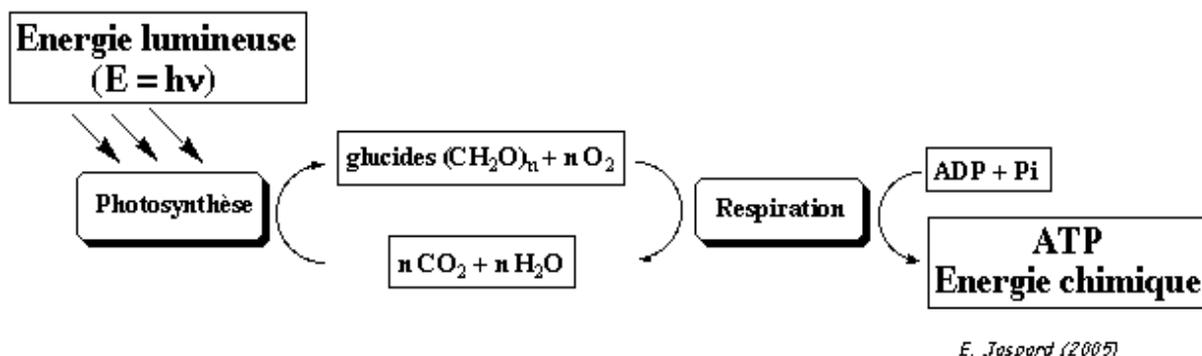


Figure 4 : Représentation de l'équilibre entre les réactions de photosynthèse et de respiration, chez les organismes photosynthétiques [15]

Par ailleurs, le seul prédateur de la spiruline est le flamant rose ; mais c'est aussi cet animal qui lui fournit, par l'intermédiaire de ses fientes, les éléments dont elle a besoin pour sa croissance. Voici quelques précisions :

la spiruline est la principale nourriture du flamant rose nain, *Phoeniconaias minor*. Les rebords internes du bec de l'oiseau contiennent de minces lamelles et des plaquettes filtrantes. Quand il bouge sa langue d'arrière en avant, elle agit comme un piston et l'eau est repoussée hors du bec à travers les rebords filtrants. De cette façon, les flamants ne boivent pas d'eau salée et la spiruline est piégée dans le bec. Comme la langue possède de nombreuses barbes épineuses sur sa surface supérieure, elle entraîne, par son action de pompe, la pâte "d'algues" dans le long cou vers l'estomac.

Le sel inévitablement absorbé avec la spiruline humide est excrété par les reins.

Le flamant se nourrit donc en balayant son bec de part et d'autre de l'eau peu profonde dans laquelle il émet aussi ses déjections. C'est ainsi que se crée un cycle de l'azote : l'oiseau absorbe de l'azote à travers les protéines de la spiruline et il en restitue ensuite une bonne partie, que la spiruline utilise à son tour comme élément nutritif [5].

1.3 Ecologie

Ce qui distingue le genre *Arthrospira* des autres cyanobactéries, c'est le milieu naturel où elles vivent. En effet, les spirulines prolifèrent dans des eaux très minéralisées, extrêmement alcalines et chaudes. Ces conditions environnementales très contraignantes excluent la plupart des autres êtres vivants. De plus, le développement des spirulines dans ces milieux contribue encore à renforcer l'effet d'exclusion, par trois phénomènes [5][10] :

- en consommant les carbonates et bicarbonates de son milieu, la spiruline tend à augmenter l'alcalinité de celui-ci ;
- ses filaments pigmentés et flottants forment un écran qui prive de lumière solaire les rares algues qui pourraient s'accommoder du milieu de culture (exemple de la chlorelle, microalgue comestible pouvant proliférer dans des cultures de spirulines trop peu concentrées) ;

- en sécrétant des molécules qui s'avèrent actives contre une vaste gamme de bactéries.

D'autre part, le flamant rose nain, *Phoeniconaias minor*, a joué dans le passé un rôle de vecteur aérien pour la spiruline, laquelle a ainsi pu coloniser progressivement de nouveaux habitats. En effet, les flamants ont pour habitude de voler sur de longues distances pour rechercher de la nourriture. Or, la spiruline s'accrochant aux écailles de leurs pattes et à leurs plumes, elle s'est trouvée ainsi transportée dans d'autres lacs alcalins où elle a pu proliférer.

A l'état naturel, la spiruline est donc retrouvée dans des lacs de la ceinture intertropicale du globe terrestre (cf. tableau II), dont les eaux sont riches en carbonate de sodium (Na_2CO_3), bicarbonate de sodium (NaHCO_3), divers minéraux et une source d'azote fixé.

Ces lacs sont situés approximativement entre 35° de latitude Nord et 35° de latitude Sud ; ils sont peu profonds et agités par des vents légers.

En dehors des sites cités dans le tableau II, d'autres endroits sont possibles, notamment partout où vivent le flamant nain (Afrique et Asie) et le flamant de James, *Phoenicoparrus jamesi* (Amérique du sud).

Tableau II : Sites géographiques où pousse naturellement la spiruline [5]:

Noms des pays	Localisations précises
AFRIQUE	
Algérie Tchad	Tamanrasset Région du Kanem : lacs Latir, Ouna, Borkou, Katam, Yoan, Leyla, Bodou, Rombou, Moro, Mombolo, Liwa, Iseirom, Ounianga kebir
Soudan Djibouti Ethiopie	Cratère de Djebel Marra Lac Abber Lacs Aranguadi, Lesougouta, Nakourou, Chiltu, Navasha, Rodolphe
Congo	Mougounga
Kenya Tanzanie Tunisie	Lacs Nakuru, Elmenteita, Cratère, Natron Lac Natron Lac Tunis; Chott el Jerid
Zambie Madagascar	Lac Bangweoulou Beaucoup de petits lacs près de Toliara
ASIE	
Inde Myanmar	Lacs Lonar et Nagpur, réservoir près de Madurai Lacs Twyn Taung, Twyn Ma et Taung Pyank
Sri Lanka Pakistan Thaïlande	Lac Beira Mares près de Lahore Lacs d'effluents d'une usine de tapioca, province de Radburi, 80 km au Sud-Ouest de Bangkok
Azerbaïdjan	
AMERIQUE du SUD	
Pérou	Réservoir d'eau près de Paracas Près de l'île d'Amantani dans le lac Titicaca
Mexique	Lac Texcoco ; Lac Cratère
Uruguay	Montevideo
Equateur	Lac volcanique Quillotoa : cratère de 1km de diamètre
AMERIQUE du NORD	
Californie Haïti Rép.Dominicaine	Oakland ; Del Mar Beach Lac Gonâve Lac Enriquillo
EUROPE	
Hongrie France	Camargue

1.4 Reproduction

Son mode de reproduction est la **bipartition par scission simple**. C'est une reproduction asexuée, par segmentation des filaments ; ce processus ne doit pas être confondu avec la mitose, laquelle n'existe que chez les eucaryotes [1].

Sa vitesse de multiplication est particulièrement rapide dès que la température dépasse 30°C à l'ombre ; lorsque ces conditions sont réunies et que le milieu est favorable, le temps de génération est très court (7 heures).

Les filaments microscopiques se développent simultanément et ils constituent des "fleurs d'eau" également appelés "blooms" [5].

1.5 Déplacement

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

Le trichome exerce un mouvement oscillatoire, de forme hélicoïdale, en rotation autour du grand axe. La spiruline peut donc évoluer dans l'eau en se vissant ; ce déplacement s'effectue à la vitesse de 5µm par seconde. La microscopie électronique a permis de comprendre la motilité des filaments : cette technique met en évidence l'existence de *fimbriae* de 2 à 10 nm de diamètre et 1 à 2 µm de longueur ; ces filaments tubulaires dépassent de minuscules pores situés sur le pourtour des extrémités de la cellule. Les *fimbriae* sont aplatis contre la paroi cellulaire externe et pointent dans la même direction. Comme des rameurs sur une galère, ils propulsent le filament d'arrière en avant [10].

La spiruline peut également fabriquer des vésicules de gaz d'environ 70 nm de long et 10 nm de diamètre, faites d'une chaîne de protéines tissées. Ces vésicules ressemblent à des tubes creux cylindriques comportant des capuchons coniques. Elles se trouvent habituellement près des parois terminales des cellules et sont empilées les unes sur les autres. Elles se forment et se remplissent de gaz lorsque la lumière du soleil apparaît : tels des ballons dirigeables, elles permettent au filament de spiruline de remonter en surface pour recevoir la lumière et ainsi commencer la photosynthèse [5].

A la fin du jour, les cellules sont surchargées par les grandes quantités d'hydrates de carbone fabriquées, lesquels engendrent une haute pression osmotique interne. Ne pouvant plus supporter cette pression, les vésicules implosent. Le gaz libéré est comprimé et absorbé par les fluides environnants. Les vésicules s'effondrent et le filament de spiruline redescend vers le fond obscur. Pendant la nuit, grâce au phénomène de respiration précédemment décrit, la majeure partie des hydrates de carbone accumulés est convertie en protéines, pendant que du CO₂ est perdu. Pour recommencer un cycle de photosynthèse le lendemain, de nouvelles vésicules de gaz se forment de sorte que les filaments de spiruline soient à la surface de l'eau avant l'aube [5].

Par conséquent, on peut en déduire qu'une limitation en CO₂ augmente la flottabilité alors que la production d'hydrates de carbone la diminue.

Ces deux méthodes de locomotion permettent à la spiruline de se protéger elle-même contre une overdose mortelle de soleil. Les mouvements de circulation de bas en haut puis de haut en bas lui permettent d'absorber la juste quantité de lumière dont elle a besoin. Elle est aussi capable de ramper hors de la dangereuse spire de ses compagnes qui flottent toutes en masse, dès le lever du jour.

2. La spiruline : de sa naissance à nos jours

- Les cyanobactéries ont eu un rôle majeur dans l'évolution de notre planète, en y créant une atmosphère contenant de l'oxygène. Avant leur apparition, l'atmosphère terrestre ne contenait qu'un taux extrêmement faible d'oxygène, et la biosphère était majoritairement composée de bactéries anaérobies utilisant, entre autres, le cycle du soufre. Ainsi, par leur production d'oxygène par photosynthèse, les cyanobactéries ont permis l'apparition et le maintien sur Terre de formes de vie plus évoluées, telles que les algues, les plantes puis les animaux [1].
En fait, nous leur devons les conditions nécessaires à la vie sur Terre, telle que nous la connaissons actuellement. L'oxygène est en effet un constituant vital de tous les tissus vivants : végétaux, animaux et êtres humains en ont besoin, à l'état libre ou combiné, pour vivre. L'oxygène constitue 21 % en volume de l'atmosphère terrestre, 85,8 % en masse des océans et 60 % du corps humain [19].
- La spiruline est considérée, par les biologistes, comme l'un des premiers "végétaux" apparus sur terre, il y a environ 3,5 milliards d'années [20].
- En 1492, Christophe Colomb la découvre au Mexique, sous forme de petites galettes vertes séchées et le note dans son carnet de bord. Il mentionne ce qu'il croit être une algue, sous le vocable « potion magique » [5].
La spiruline constituait alors la nourriture principale des Aztèques au Mexique, jusqu'à la conquête espagnole au XVI^e siècle ; ils la récoltaient sous le nom de "tecuilatli", autour du lac de Texcoco. Ils la considéraient comme un produit mystérieux sécrété par les minéraux et la mangeaient en complément des céréales. Mais, n'étant pas du goût des conquistadors, lesquels préféraient le cacao et le maïs, elle est ensuite tombée dans l'oubli [5].
- Quatre siècles plus tard, en 1939, Y. Creach, pharmacienne des troupes coloniales françaises découvre des galettes d'algue séchée sur un marché à Massakong (Tchad). Ces galettes étaient principalement consommées par les gens malades, les femmes après leur accouchement et les blessés suite aux guerres entre tribus rivales. Cette pharmacienne en rapporte quelques échantillons en France pour les analyser et les identifier. Mais étant donné le contexte à cette époque (deuxième guerre mondiale), les recherches n'ont pas beaucoup avancé et elles ont été stoppées après son décès [21].
- En 1940, un chercheur, P. Dangeard, rapporte l'expérience d'Y. Creach, en publiant en France un article qui mentionne pour la première fois l'existence de galettes consommées par certaines populations du Tchad. Il écrit qu'elles sont fabriquées à partir de " l'algue bleue *Spirulina* " et connues sous le nom de "Dihé" [22].
- En 1959, l'anthropologue et cinéaste français M.Y. Brandily signale à son tour dans la revue " Sciences et Avenir ", l'existence au Nord de la République du Tchad, d'une population (les Kanembous) se nourrissant de ces galettes séchées depuis des temps reculés.

Ces villageois consommaient ces "gâteaux d'algue" avec du mil et cela constituait leur repas principal. Brandily pensait alors qu'il s'agissait de la chlorelle (algue verte d'eau douce) [23]. Cette bouillie verte récoltée à la surface des lacs de cette région, à l'aide d'un filet à mailles très fines, a intrigué certains occidentaux. C'est ainsi que l'Institut Français du Pétrole (IFP), par l'intermédiaire de l'un de ses membres G. Clément, a lancé des études sur cette fameuse algue [24]. Grâce à cet institut, financé en grande partie par une taxe sur les carburants, la France a pu devenir pionnière en ce qui concerne l'étude de la spiruline.

Son intérêt nutritionnel ayant été soulevé, l'IFP a alors aidé à la création d'un site de production au Mexique dirigé par l'ingénieur français H. Durand-Chastel [5].

- En effet, au début des années 1960, cet ingénieur l'a redécouvert par hasard alors qu'il débarquait au Mexique pour prendre la direction de Sosa Texcoco, une unité de production de carbonate de soude. Cette usine tire sa matière première (la saumure) des sédiments du lac au bord duquel elle est implantée. Mais, Durand-Chastel est rapidement intrigué par la formation de matières organiques qui perturbent la cristallisation des carbonates. Le hasard a voulu qu'en 1967 se déroule à Mexico, le congrès international du pétrole. A cette occasion, Durand-Chastel a assisté à une conférence sur la spiruline, présentée comme une substance naturelle consommée depuis très longtemps par une ethnie des rives du lac Tchad, en Afrique centrale.

Il a pu faire le lien avec l'intrus qui lui causait des problèmes. Mais, d'une ennemie, l'ingénieur a décidé de faire de cette "algue" une amie, en la cultivant dans les bassins semi-naturels d'évaporation de sa société Sosa Texcoco. Il a réussi à mettre au point un procédé de fabrication d'une pâte comestible et exportable. C'est lui l'initiateur de la première installation industrielle productrice de spiruline (la variété qu'il a cultivé depuis 1968 est *Spirulina maxima*). Sa production commerciale a débuté en 1976 [5].

- Pendant ce temps, toujours au début des années 1960, les publications sur la spiruline commencent à apparaître. A cette époque, le botaniste belge J. Léonard, lors d'une expédition transsaharienne confie un échantillon de produit végétal à son confrère P. Compère pour identification. Ce dernier lui annonce qu'il s'agit de *Spirulina platensis* [25].

- En 1968, l'américain R. Fox, docteur en microbiologie fonde le mas laboratoire de "la Roquette", à Saint-Bauzille de Putois dans l'Hérault. Il veut ainsi développer la recherche et la formation sur la culture des micro-algues. Ce scientifique est également titulaire d'un diplôme en zoologie de Pomona College, auteur d'un travail de "postgrad" en bactériologie à l'université de Californie (Los Angeles) et titulaire d'un doctorat en microbiologie (université de Strasbourg) [5].

En découvrant au début des années 1970, la spiruline produite à Sosa Texcoco et ses qualités, il décide d'en faire un outil de politique humanitaire. Son laboratoire lui permet alors d'étudier la culture de la spiruline et de mettre au point des moyens simples et bon marché pour la cultiver dans des villages des pays en voie de développement (PVD).

En 1971, il fonde une association (ACMA = Association pour Combattre la Malnutrition par l'Algoculture) qui développe le concept de ferme de spiruline. L'algue représente pour lui le complément nutritionnel idéal pour lutter contre la faim dans les pays en voie de développement. Avec l'aide de son épouse, il consacre alors l'essentiel de son temps à sa diffusion en Afrique et en Asie du sud-est, malheureusement avec plus ou moins de succès. En effet, les nombreux atouts de la spiruline suscitent rapidement l'engouement des humanitaires : vitesse de croissance, culture adaptée aux conditions climatiques des pays du Sud, bonne conservation une fois séchée, prix de revient au kilo entre 2 et 10 euros. Pourtant, elle souffre de la non-reconnaissance par certains organismes internationaux (dont la FAO : Food and Agricultural Organization) : pour eux, la spiruline n'est qu'une solution parmi d'autres.

- Parallèlement, en 1970, un rapport du Dr Hiroshi Nakamura (microbiologiste président du comité de développement de la spiruline au Japon) indique toutes les caractéristiques de celle-ci. Ce scientifique japonais a réuni les études concernant "l'algue" qui avait été utilisée comme nourriture pour le peuple pendant le blocus américain, durant la seconde guerre mondiale. Son rapport a été ensuite publié, en 1978, dans l'ouvrage " Food from Sunlight " du Dr Christopher Hills [26]. Il est le fondateur de "University of the Trees" en Californie, et aussi le président de "Microalgae International Union". Son livre apporte en complément, des indications de culture et de consommation. Les produits de la vente de cet ouvrage ont notamment servi à financer des projets d'aide alimentaire aux pays défavorisés. Ces deux hommes ont été les pionniers de la recherche sur la spiruline, observant sur eux-mêmes ses effets bénéfiques [5][10].
- Au cours de la conférence alimentaire mondiale en 1974, la spiruline a été déclarée « meilleure source alimentaire du futur » par l'Organisation des Nations Unies (ONU) [10].
- En 1979, H. Durand-Chastel quitte le Mexique et l'usine sera contrainte de modifier son activité en 1982, suite à des problèmes de qualité de production. C'est l'entreprise Earthrise qui prend le relais, en ouvrant une ferme dans le désert californien. En pleine vague New Age, cette entreprise lance la « superfood » (super aliment aux multiples vertus). Conditionnée sous la forme de petites gélules, la spiruline conquiert alors toute l'Amérique, d'Ouest en Est. Sous la forme de poudre, elle est utilisée pour la réalisation de cocktails dont les amateurs sont, paraît-il, nombreux ! [27]
- En 1984, après le Mexique (lac Texcoco) et l'Afrique (lac Tchad), la Chine se lance dans la production de spiruline à l'état naturel (lac Chenghai) [5].
- Au début des années 1990, l'organisation humanitaire suisse Antenna Technology, renoue avec le projet du couple Fox. Cette ONG (organisation non gouvernementale) prétend que la spiruline serait la solution au problème de la faim dans le monde, étant donné qu'elle peut permettre la production d'une grande quantité d'éléments nutritifs essentiels sur un espace très réduit : en effet, dans une ferme exploitant la spiruline, le rendement est de 9 tonnes de protéines à l'hectare contre 1 tonne pour le blé ou le soja [28].

Afin d'asseoir la crédibilité scientifique de son programme, Antenna Technology a financé aussi quelques études qui seront évoquées dans la 2^{ème} partie.

- Le premier colloque international sur la spiruline s'est tenu au lac Chenghai (Yunnan, Chine) en 1996 [10].

Depuis 1986, R. Fox est Président d'honneur de l'International Society for Applied Algology. Actuellement retraité depuis quelques années, il étudie toujours les possibilités de nouvelles souches "mutantes" de spiruline. Son association ACMA n'existe plus mais des scientifiques, des membres d'associations humanitaires et d'autres associations s'intéressent toujours à la production et à l'utilisation de cette cyanobactérie. Cependant, à l'heure actuelle, la spiruline n'est toujours pas reconnue d'utilité publique par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS). Avec l'aide du sénateur Durand-Chastel, ancien directeur de Sosa Texcoco (production intensive de spiruline au Mexique) et d'un ami italien, R. Fox a aussi créé un institut international de la spiruline, lequel délivre maintenant un diplôme d'algoculture.

A noter qu'H. Durand-Chastel est récemment décédé (le 19 octobre 2007), à l'âge de 90 ans. Il a été l'un des pionniers concernant la spiruline puisqu'il a été le premier à produire de la spiruline à grande échelle (1000 kg/jour), dès 1976, à partir des bassins semi-naturels reliques du lac Texcoco des Aztèques de Mexico. Il avait également obtenu par la suite un brevet pour la production en photobioréacteur d'une spiruline enrichie.

En France, c'est J.P. Jourdan qui est l'un des plus grands connaisseurs en spiruline. Diplômé du MIT (Massachusetts Institute of Technology), il a fait sa carrière dans l'industrie chimique avant de consacrer sa retraite, dans le sud de la France, au développement de la spiruline en faveur des enfants du tiers-monde. Après avoir été l'élève de R. Fox et de F. Ayala, il a collaboré activement avec des ONG dont les programmes impliquent la spiruline. Il a notamment écrit un ouvrage de référence, disponible sur *internet* et régulièrement remis à jour, dans lequel il partage son expérience pratique de plus de 15 années de production de spiruline. Il y montre aussi comment appliquer les méthodes du génie chimique pour perfectionner cette production, même à petite échelle et sans moyens techniques sophistiqués [29].

Concernant la spiruline en France, le Conseil Supérieur d'Hygiène Publique a donné, en 1984, un avis favorable pour sa consommation par l'Homme [5][10].

Depuis, les recherches ont beaucoup évolué et on a découvert d'autres applications possibles de la spiruline, notamment dans le domaine médical.

Afin de tenter de démêler le vrai du faux au sujet des effets thérapeutiques potentiels qui lui sont attribués, l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) a consacré un colloque de 3 jours sur l'île des Embiez (Var), au mois de mai 2004 [30].

A noter que dans l'exposition permanente « l'Homme et les gènes », proposée à la Cité des Sciences et de l'Industrie (Paris, la Villette), la spiruline est présentée comme le plus ancien micro-organisme de notre planète [31].

3. Aspects nutritionnels

3.1 Analyse nutritionnelle qualitative et quantitative

Selon les différentes études réalisées afin de déterminer de façon précise les teneurs en nutriments et micronutriments de la spiruline, il apparaît des écarts assez conséquents. En premier lieu, cela vient du fait qu'il existe différentes souches de spirulines, de même qu'il existe aussi différents cépages dans le domaine viticole. De plus, et c'est la principale raison invoquée par les chercheurs, les différentes méthodes de culture, récolte, séchage et conservation des échantillons influencent davantage les écarts de composition biochimique [32]. C'est pourquoi toutes les spirulines proposées sur le marché mondial ne sont pas exactement identiques sur le plan de leur composition nutritionnelle. Les teneurs évoquées par la suite sont donc des valeurs moyennes.

3.1.1 Protéines

3.1.1.1 Teneur et composition

La spiruline est particulièrement riche en protéines puisqu'elles représentent 50 à 70 % de son poids sec. A noter que les teneurs les plus élevées sont obtenues lorsque la récolte a lieu au début de la période lumineuse. D'autre part, par comparaison avec les autres sources de protéines végétales qui sont toutes moins riches, la spiruline est consommable dans sa totalité [32].

D'un point de vue qualitatif, les protéines de la spiruline ont une valeur biologique très haute car elles renferment tous les acides aminés essentiels pour l'adulte (tableau III) ; ceux-ci représentent 47 % du poids total des protéines. Les acides aminés essentiels les moins représentés sont les molécules soufrées : méthionine et cystéine ; ils sont toutefois présents à plus de 80 % de la valeur idéale définie par la FAO (sur la base de l'albumine de l'œuf et de la caséine).

Il a été démontré que le séchage sur tambours chauffants utilisé lors de la production industrielle, réduit de 30 % environ la teneur en méthionine par rapport au séchage par pulvérisation [33]. Un apport optimal d'acides aminés essentiels peut être obtenu en consommant la spiruline en complément de céréales telles que le riz, le blé et le millet, ou des graines oléagineuses (sésame par exemple).

Le tableau III indique, à titre d'exemple, la teneur en acides aminés dans 1 kg de spiruline de la marque " Flamant Vert " (selon la notice) [34].

A noter que l'histidine et la cystéine sont considérés essentiels chez les nouveau nés et enfants jusqu'à l'âge de 10 ans ; l'arginine est aussi rattachée aux acides aminés essentiels car notre organisme n'en produit pas assez.

Tableau III : Teneur de la spiruline "Flamant Vert" en acides aminés [35]

Nom des acides aminés	Teneur en g/kg de spiruline (poids sec)
alanine	47
arginine	43
acide aspartique	61
acide glutamique	91
cystine	6
glycine	32
histidine	10
isoleucine	35
leucine	54
lysine	29
méthionine	14
phénylalanine	28
proline	27
sérine	32
thréonine	32
tryptophane	9
tyrosine	30
valine	40

en gras : acides aminés essentiels

Le profil de référence des acides aminés (tableau IV) permet d'évaluer la qualité des protéines alimentaires, à partir de l'indice chimique corrigé de la digestibilité ; il est fondé sur le besoin estimatif moyen en acides aminés essentiels et en protéines totales chez les enfants de 1 à 3 ans.

Tableau IV : Profil recommandé pour la teneur en acides aminés des protéines alimentaires [36]

Acide aminé	Profil recommandé (en mg par g de protéine)
Histidine	18
Isoleucine	25
Leucine	55
Lysine	51
Méthionine + Cystéine	25
Phénylalanine + Tyrosine	47
Thréonine	27
Tryptophane	7
valine	32

3.1.1.2 Utilisation protéique nette

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

Contrairement à d'autres micro-organismes proposés comme source de protéines (levures, chlorelles...), la spiruline ne possède pas de paroi cellulosique ; elle a donc l'énorme avantage d'être parfaitement digestible sans cuisson ni autre traitement destiné à rendre ses protéines accessibles. Leur digestibilité est évaluée à 83 % [32].

La valeur nette d'utilisation protéique est estimée entre 53 et 61 % [32].

3.1.1.3 Efficacité protéique

Il s'agit du gain de poids d'un animal ou d'un individu, divisé par le poids des protéines ingérées. Ces mesures sont en général effectuées sur le rat en croissance et les protéines de référence sont la lactalbumine ou la caséine. La valeur de l'efficacité protéique de la spiruline, déterminée chez le rat en croissance est estimée, suivant les auteurs, entre 1,80 et 2,6, la valeur pour la caséine étant de 2,5 [32].

Selon une étude rapportée par M. Vermorel [33], la vitesse de croissance de rats recevant de la spiruline comme seule source de protéines est supérieure ou égale à celle de rats témoins. De plus après supplémentation en acides aminés essentiels, les rats recevant de la spiruline 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 issus de spirulines, ce qui est encore confirmé par les teneurs en acides aminés libres trouvées dans le sang et les muscles des animaux testés.

Plus récemment, chez l'Homme, le ratio d'efficacité protéique a été estimé à 1,90 pour la spiruline seule. Le tableau V, qui illustre les résultats de cette étude, montre l'intérêt de l'ajout de spiruline pour améliorer ce ratio.

Tableau V : Comparaison des valeurs du ratio d'efficacité protéique de la spiruline et d'autres céréales [32]

Nature de l'aliment apportant les protéines	Valeur du ratio d'efficacité protéique
spiruline seule	1,90
maïs seul	1,23
riz seul	2,2
blé seul	1,15
riz + spiruline (rapport 3 pour 1)	2,35

3.1.1.4 Rôle des protéines

Dans l'organisme, les protéines exercent des fonctions diverses :

- structurales : elles rentrent dans la composition des acides nucléiques, du collagène et de l'élastine du derme et de l'hémoglobine ; l'actine et la myosine sont deux protéines indispensables à la contraction musculaire ;
- régulatrices : les enzymes, les hormones, les anticorps et les récepteurs sont des protéines ;
- énergétiques : l'oxydation de 1g de protéine fournit une énergie égale à 4 kcal.

3.1.1.5 Besoins de base en protéines pour l'organisme humain

Jusqu'à l'âge de 3 ans, ce besoin est de 2g par kg de poids corporel et par jour. Chez l'adulte, il est égal à 0,75 g par kg et par jour. Ces besoins de base augmentent de façon accrue en cas de stress ou d'infections. La grossesse, l'allaitement et la pratique intense de sport contribuent également à accroître les besoins protéiques.

3.1.2 Lipides

3.1.2.1 Lipides totaux

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

La fraction saponifiable est surtout composée de monogalactosyl diglycérides et de digalactosyl diglycérides (23 %), de sulfoquinovosyl diglycéride (5 %), et de phosphatidyl glycérol (25,9 %). Les triglycérides sont rares (0,3 %) et on détecte en outre 4,6 % de phospholipides indéfinis [5].

3.1.2.2 Acides gras

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

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

Les besoins en acides gras essentiels correspondent à 1 à 2 % des calories journalières chez l'adulte et à 3 % de ces calories chez les enfants.

Actuellement, les nutritionnistes recommandent une alimentation fournissant un rapport oméga-6/oméga-3 situé entre 4 et 5 [36].

Le profil des acides gras de la spiruline est rapporté dans le tableau VI. Le tableau VII indique les teneurs en différents acides gras issus d'*Arthrospira maxima* produite par la société Sosa Texcoco.

Tableau VI : Profil typique des acides gras d'*Arthrospira platensis* [32] :

Acides gras	% des acides gras totaux
palmitique (16:0)	25 à 60 %
linoléique (18:2) oméga-6	10 à 30 %
gamma-linolénique (18:3) oméga-6	8 à 40 %
oléique (18:1) oméga-6	5 à 16 %
palmitoléique (16:1) oméga-6	0,5 à 10 %
stéarique (18:0)	0,5 à 2 %
alpha-linolénique (18:3) oméga-3	traces

La spiruline est considérée comme l'une des meilleures sources alimentaires connues d'acide γ -linoléique, après le lait humain et quelques huiles végétales peu courantes, fort chères et non chauffées (huiles d'onagre, de bourrache, de pépin de cassis et de chanvre). Par exemple, la spiruline " Flamant Vert " renferme 10 g de cet acide gras et 8 g d'acide linoléique par kg de matière sèche.

La présence d'acide γ -linoléique est à souligner du fait de sa rareté dans les aliments courants et de sa haute valeur alimentaire présumée. C'est en effet un acide gras essentiel qui joue un rôle clé au niveau de la régulation des mécanismes cellulaires (cf. deuxième partie 2.).

Tableau VII : Teneur moyenne en acides gras de *Arthrospira maxima* produite par la société Sosa Texcoco au Mexique [5] :

Acides gras	% des acides gras totaux
palmitique (16:0)	35,6 %
linoléique (18:2) oméga-6	23,36 %
γ-linolénique (18:3) oméga-6	19,6 %
α-linolénique (18:3) oméga-3	7,3 %
oléique (18:1)	4,7 %
palmitolinoléique (16:1)	4,08 %
palmitoléique	3,33 %
mystirique (14:0)	1,1 %
laurique (12:0)	0,38 %
stéarique (18:0)	0,33 %
heptadécaénoïque (17:1)	0,22 %

3.1.2.3 Lipides insaponifiables

Ils sont essentiellement représentés par des paraffines (25 % : hydrocarbures saturés à longues chaînes), des alcools terpéniques (5 à 10 %) et des stérols (1,5 %) [32].

3.1.2.4 Rôles des lipides et besoins spécifiques en acides gras essentiels

Les lipides constituent une source de réserve énergétique, par l'intermédiaire des triglycérides stockés dans le tissu adipeux. L'oxydation d'1 g de lipides fournit 9 kcal.

Les phospholipides entrent dans la composition des membranes cellulaires et du surfactant pulmonaire.

Les acides gras polyinsaturés sont les précurseurs des prostaglandines, des leukotriènes et des tromboxanes qui sont des médiateurs chimiques des réactions inflammatoires et immunitaires.

Les sulfolipides de la spiruline suscitent actuellement de nouvelles recherches dans le but de prouver leur effet thérapeutique potentiel dans le cadre des infections par le virus de l'immunodéficience humaine (VIH).

Les acides α-linolénique et linoléique sont considérés comme des acides gras essentiels car ils ne peuvent être synthétisés par l'organisme à partir d'autres acides gras ou de glucose.

Pour les nouveaux nés, durant la phase de développement prénatal et jusqu'à l'âge de 2 ans, 4,5 % de l'apport énergétique total doit provenir de l'acide linoléique et 1 % doit provenir de l'acide α-linolénique.

Une femme enceinte a besoin quotidiennement de 10 g d'acide linoléique (11 g lors de l'allaitement) et de 2 g d'acide α-linolénique (2,2 g si elle allaite).

Chez l'adulte, les apports journaliers conseillés sont respectivement de 5 g et 1,5 g [36].

3.1.3 Glucides

Ils représentent 15 à 25 % de la matière sèche des spirulines.

L'essentiel des glucides assimilables est constitué de polymères tels que des glucosanes aminés (1,9 % du poids sec) et des rhamnosanes aminés (9,7 %) ou encore de glycogène (0,5 %) [32].

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.

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

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

A noter que des recherches ont déjà été menées concernant les polysaccharides de la spiruline, lesquels exerceraient des effets stimulants sur les mécanismes de réparation de l'ADN (cf. deuxième partie 2.2.3.).

Un polysaccharide spécifique de la spiruline, le spirulan, a été isolé et partiellement caractérisé [37]. Porteur de nombreux résidus sulfate et contenant de l'acide uronique, il est fortement polyanionique ; son squelette consiste essentiellement en méthyl-rhamnose et méthyl-xylose. Au vu des résultats des études publiées, cette substance semble prometteuse dans certaines applications thérapeutiques (cf. deuxième partie 2.2.2.).

3.1.4 Acides nucléiques

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. Il est généralement admis que la dose maximum admissible à long terme d'acide nucléique se situe aux alentours de quatre grammes par jour, pour un adulte. Il faut également tenir compte du fait 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 *A. platensis* comme chez *A. maxima*, on rapporte des valeurs de 4,2 à 6 % d'acides nucléiques totaux dans la matière sèche. La proportion d'ADN serait d'un quart à un tiers par rapport à l'ARN [32]. Le tableau VIII compare la teneur en acide nucléique de la spiruline avec celle de trois autres aliments.

Tableau VIII : Teneur en acides nucléiques de la spiruline et d'autres aliments [32]

aliments	acides nucléiques totaux (en % de matière sèche)
viande de bœuf	1,5
foie de bœuf	2,2
spiruline	4 à 6
levure	23

La teneur en acides nucléiques des spirulines est très inférieure à celle de la généralité des êtres unicellulaires.

En se basant sur une valeur moyenne de 5 % en acides nucléiques, la limite quotidienne de 4 g d'acides nucléiques représente le contenu de 80 g 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.

3.1.5 Vitamines

3.1.5.1 Le β -carotène (précurseur de la vitamine A)

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

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

Ce caroténoïde provitaminique représente 40 à 60 % des caroténoïdes présents dans la spiruline. On trouve entre 700 et 2000 mg de β -carotène et environ 100 à 600 mg de cryptoxanthine par kg de spiruline sèche ; ces deux caroténoïdes sont convertibles en vitamine A par les mammifères [38].

Cette conversion du β -carotène en vitamine A se fait chez l'humain dans une proportion d'environ 17 à 20 %. Cette proportion peut varier selon la dose de β -carotène absorbée et selon l'état physiologique de la personne.

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

D'autre part, l'absence de rétinol (vitamine A libre) exclut un éventuel risque de surdosage, le β -carotène n'étant pas toxique par accumulation, au contraire de la vitamine A.

Par ailleurs, on sait maintenant que chez la femme enceinte, une surdose en vitamine A peut entraîner des malformations du fœtus : ce risque est si réel que l'OMS a établi, en 1998, une série de recommandations en vue de sécuriser l'apport de vitamine A aux femmes en âge de procréer. 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.

Il est également important de noter que les teneurs en β -carotène dans la spiruline peuvent varier en fonction des conditions de séchage, de la granulométrie et des conditions de conservation à long terme du produit final. Les valeurs annoncées au début du paragraphe correspondent à des échantillons de spiruline séchée par pulvérisation, donc sans chauffage ; dans le cas du séchage sur tambours chauffants, ces valeurs seraient diminuées de près d'un tiers. En effet, les caroténoïdes étant très sensibles à l'oxydation, il faut avoir connaissance des procédés de séchage utilisés, de façon à s'assurer de leur préservation dans le produit fini.

Du point de vue du carotène, la meilleure méthode de séchage serait la lyophilisation (malheureusement très chère), suivie du séchage en couche mince à température inférieure à 60°C ; en ce qui concerne la conservation à long terme, les formes en flocons ou en semoule grossière de spiruline sont mieux que la forme poudre.

La biodisponibilité des caroténoïdes de la spiruline a été démontrée par plusieurs études menées chez le rat ou le poulet [39][40][41] et chez l'Homme [42].

De plus, une étude en 1993 portant sur 5 000 enfants indiens d'âge préscolaire, a montré la surprenante efficacité d'une dose quotidienne unique d'un gramme de spiruline sur la déficience chronique en vitamine A ; selon cette étude, cette très faible dose de spiruline suffirait à réduire considérablement les risques de cécité et d'atteinte neurologique consécutifs à la déficience en vitamine A chez l'enfant (cf. deuxième partie 2.9.).

3.1.5.2 Les tocophérols (vitamine E)

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

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

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

Des disparités de teneur existent et proviennent principalement des conditions de séchage de la spiruline.

Dans son ouvrage [5], Fox considère comme très probable que le séchage par « spray-drying », lequel brise très fortement les filaments de spiruline, réduise considérablement la durée de conservation des vitamines sensibles à l'oxydation, dont la vitamine E.

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

3.1.5.3 Les vitamines du groupe B

Bien que moins riche que la levure en vitamines du groupe B (B12 exceptée), la spiruline constitue néanmoins une bonne source de ces cofacteurs : le tableau XI précise les teneurs de la spiruline pour les différentes vitamines de ce groupe.

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

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

Sa structure chimique est proche de celle de l'hème, mais l'atome central de fer est remplacé par un atome de cobalt. Son absorption digestive (au niveau de l'iléon) fait appel à une glycoprotéine sécrétée par les cellules pariétales de l'estomac.

Un déficit en vitamine B12 entraîne une forme d'anémie, appelée anémie de Biermer ou anémie pernicieuse. Celle-ci se caractérise par la présence de globules rouges de très grande taille (macrocytose). La carence peut provenir d'un défaut d'apport alimentaire en cette vitamine (régimes végétaliens stricts, malnutrition) ou d'un défaut d'absorption.

D'autre part, des études ont montré que certains états pathologiques entraînent systématiquement une déficience en vitamine B12 : c'est le cas par exemple des infections à VIH [43][44].

D'après l'ancienne méthode standard, la teneur en vitamine B12 de la spiruline serait quatre fois plus riche que celle du foie cru, longtemps considéré comme meilleure source. Cependant, il existe une controverse à propos de la biodisponibilité réelle du complexe B12 de la spiruline chez l'homme.

Actuellement, la méthode de choix pour le dosage de la vitamine B12 est 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 [45]. Il en résulte que le corrinoïde prédominant (83 %) est une pseudo-B12, le 7-adeninyl cyanocobamide : il ne présente pas d'activité vitaminique B12 chez l'homme mais n'interfère pas dans le métabolisme normal de la vitamine B12 [45].

La véritable vitamine B12 active représente tout de même 17 % des corrinoïdes totaux.

Une note technique de la firme « Cyanotech » mentionne une teneur totale en corrinoïdes de 7 µg par gramme de spiruline et une fraction de 36 % représentant la vitamine B12 assimilable par l'homme [46].

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

Il serait souhaitable que des recherches spécifiques soient entreprises afin de déterminer si certaines souches de spiruline et/ou certaines conditions de culture, pourraient permettre l'obtention d'un meilleur rapport B12/analogues inactifs. Il est sans doute probable que les autres sources alimentaires de vitamine B12 renferment aussi une proportion d'analogues sans intérêt nutritionnel.

3.1.6 Minéraux

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

- dans le corps humain, 99 % du calcium se situe dans les os et les dents. Le restant sert à la coagulation du sang, à la contraction musculaire, à la stimulation nerveuse, au fonctionnement de la parathyroïde et au métabolisme de la vitamine D.
- le magnésium est un élément essentiel des os, des tissus mous et des fluides de l'organisme. Il intervient dans le métabolisme des hydrates de carbone et des acides aminés. Il participe également à la régulation des contractions neuromusculaires, à l'absorption du calcium, du phosphore, du sodium, du potassium et des vitamines C, E et B.
- le phosphore se trouve dans chaque cellule de l'organisme ; il est indispensable au transfert d'énergie, à la croissance du squelette et à la réparation des cellules.
- le potassium, avec le sodium régulent la distribution de l'eau du corps, entre les compartiments extracellulaires et intracellulaires. Il est également nécessaire à la croissance, à la contraction musculaire, à la conversion du glucose en glycogène et à de nombreuses réactions enzymatiques.

Les quantités relatives de ces éléments dans la spiruline sont équilibrées, ce qui exclut le risque de décalcification par excès de phosphore.

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

Par ailleurs, la spiruline peut être considérée comme une excellente source alimentaire de magnésium, grâce à sa teneur en chlorophylle. En effet, comme cela a été écrit précédemment, la molécule de chlorophylle renferme un atome de magnésium en son centre. Les régions aux sols pauvres en magnésium sont nombreuses et provoquent chez les populations qui les habitent, des syndromes de carences incluant des troubles cardio-vasculaires et nerveux.

La carence en magnésium est aussi très fréquente chez les enfants en état de malnutrition grave, car ceux-ci n'absorbent souvent que des bouillies de céréales pauvres en magnésium.

Les bonnes sources de magnésium alimentaire sont les produits animaux, les fruits et les légumes, ainsi que certaines eaux minérales. Les farines complètes, bien que riches en magnésium, ne constituent pas une source idéale de magnésium car il est peu absorbable du fait de la présence de phytates.

En revanche, le magnésium contenu dans la spiruline a été démontré biodisponible pour l'Homme [47].

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

3.1.7 Oligo-éléments

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

3.1.7.1 Le fer

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

Les spirulines naturelles contiennent rarement plus de 500 mg/kg de fer. Par contre, dans le cas des spirulines cultivées, l'ajout au milieu de culture de sels de fer, souvent complexés à l'EDTA (Éthylène Diamine Tétra Acétique) ou à l'acide citrique, élève facilement ces valeurs entre 600 à 1000 mg/kg, voire bien au delà. Il existe même sur le marché européen des spirulines titrant près de 6 000 mg/kg en Fe^{2+} [48].

Cette très haute teneur en fer de la spiruline cultivée est à souligner doublement du fait que les carences en fer sont très répandues, en Occident comme dans le tiers-monde, surtout chez les femmes et les enfants (anémies ferriprives), et aussi parce que les bonnes sources alimentaires de fer sont rares. Par comparaison, les céréales complètes, classées parmi les meilleures sources de fer, n'en contiennent que 150 à 250 mg/kg.

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

Quant aux suppléments de fer administrés sous forme de sulfate ferreux, ils peuvent poser des problèmes de toxicité, probablement à cause de leur effet pro oxydant et sont souvent responsables de diarrhées ou d'autres signes d'intolérance.

Dans le cas de la spiruline, la biodisponibilité élevée du fer a été démontrée tant chez le rat [49] que chez l'homme [50].

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.

La thématique du fer dans le cadre de la malnutrition infantile est assez 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. Ce n'est donc qu'au cours de la reprise de poids qu'un apport en fer est indispensable.

Par ailleurs, l'apport de fer alimentaire est lui aussi complexe : à la problématique des facteurs anti-nutritionnels qui en limitent la biodisponibilité, s'ajoute le fait que chez l'humain, son absorption 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, l'ion ferreux Fe^{++} étant mieux assimilé que l'ion ferrique Fe^{+++} .

3.1.7.2 Le zinc

Le zinc participe à la synthèse de nombreuses métallo enzymes. Il joue un rôle catalytique et module l'activité de plusieurs enzymes intervenant dans la digestion. Il est impliqué dans le métabolisme des glucides (il entre notamment dans la composition de l'insuline), des lipides et des protéines. Le zinc participe aussi à la synthèse et au métabolisme des acides nucléiques. Antioxydant essentiel, il protège l'organisme des effets toxiques des radicaux libres car il est protecteur des groupements thiols des protéines. Chez l'Homme, le zinc est également nécessaire à l'absorption du complexe des vitamines B.

Par ailleurs, il est essentiel au bon fonctionnement du système immunitaire : les personnes souffrant d'une carence importante présentent une susceptibilité accrue à divers agents pathogènes.

Le zinc participe également à la croissance, au développement cognitif et au fonctionnement moteur, notamment chez l'enfant. Après la vitamine A, le fer et l'iode, le zinc fait maintenant l'objet d'une très forte attention : il s'agit sans doute du quatrième micro-nutriment majeur dans la lutte contre la malnutrition .

L'absorption du zinc se fait au niveau de 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. Les protéines animales sont de bonnes sources en zinc biodisponible, mais elles sont souvent rares dans les pays en développement.

La spiruline cultivée sans apport intentionnel de zinc dans le milieu de culture n'en contient généralement que des traces (2 à 4 mg pour 100 g de spiruline). Ces valeurs sont insuffisantes pour que ces spirulines puissent être considérées comme de bonnes sources de zinc, puisque les apports journaliers recommandés (AJR) sont de 0,6 à 3 mg/j chez un nourrisson/enfant (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 [36].

Or, la spiruline présente l'avantage de pouvoir être très facilement enrichie en zinc. De ce fait, on trouve actuellement sur le marché européen une spiruline titrant 6 mg de zinc par gramme (cf. 4.3.2.).

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.

3.1.7.3 Le sélénium

Le sélénium est un micro-nutriment essentiel qui intervient dans la protection contre les espèces oxygénées réactives. Il est impliqué dans l'élimination des acides gras peroxydés et, en association avec la vitamine E, dans la destruction des radicaux libres. Les doses quotidiennes recommandées pour l'adulte sont de 50 µg, avec une limite supérieure de sécurité fixée à 400 µg. En effet, une toxicité chronique appelée sélénose, apparaît systématiquement pour des consommations de l'ordre de 5 000 µg/jour [51].

Plusieurs études démontrent la possibilité d'enrichir la spiruline en sélénium, par addition de sélénite de sodium au milieu de culture [51][52]. 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 [53] ; ce chercheur signale par ailleurs que sa biodisponibilité y est élevée.

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

3.1.7.4 L'iode

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

Les apports quotidiens recommandés en iode sont les suivants [36] :

- 50 µg pour les enfants de moins d'un an,
- environ 100 µg entre 1 et 10 ans,
- environ 130 µg pour les adultes,
- 175 µg pour la femme enceinte et 200 µg pendant l'allaitement.

Malheureusement, la spiruline qui pousse naturellement ne renferme pas d'iode. Des scientifiques ont donc cherché à l'enrichir en modifiant son milieu de culture. Les publications jusqu'alors disponibles sur le sujet manquent de clarté et les teneurs en iode annoncées semblent sujettes à caution.

D'autre part, comme les sels d'iode sont chers et que la spiruline ne semble pas, en conditions normales, concentrer activement cet élément, il est à craindre que l'enrichissement des milieux de culture n'aboutisse à un fort gaspillage.

Néanmoins, du fait de l'importance de l'iode, il serait 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.

3.1.8 Phytonutriments et enzymes

3.1.8.1 Caroténoïdes naturels

Les caroténoïdes sont de longues molécules très hydrophobes, colorées (jaune à rouge) et possédant un système de doubles liaisons conjuguées. Dans les caroténoïdes, on distingue d'une part les carotènes, et d'autre part, les xanthophylles : les carotènes sont constitués uniquement de carbone et d'hydrogène alors que les xanthophylles contiennent en plus des atomes d'oxygène.

La spiruline renferme un spectre large de 10 caroténoïdes différents [3][10].

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

❖ Les carotènes

Comme cela a été écrit précédemment, la spiruline est l'un des aliments les plus riches en β -carotène.

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

Depuis une vingtaine d'années, de nombreuses recherches ont montré que la consommation de fruits et de légumes riches en β -carotène assurait une véritable prévention vis-à-vis des risques de cancer. Or, le β -carotène d'origine synthétique n'a pas toujours fait la preuve de tels avantages. Une recherche récente menée en Israël montre que le β -carotène naturel issu des algues a un pouvoir antioxydant nettement plus efficace que celui d'origine synthétique : il est mieux assimilé et contient, en outre, l'isomère 9-cis que l'on ne retrouve pas dans les formulations de synthèse [54].

❖ Les xanthophylles

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

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

3.1.8.2 Chlorophylle a

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

3.1.8.3 Phycocyanine

Cette protéine complexe, hydrosoluble, est présente à hauteur de 150 g/kg de spiruline sèche. La phycocyanine est spécifique de l'algue bleu-vert puisqu'on ne la trouve nulle part ailleurs dans la nature. Elle est apparue un milliard d'années avant la chlorophylle, et peut être considérée comme un précurseur de l'hémoglobine et de la chlorophylle dans la mesure où son noyau renferme à la fois un ion fer et un ion magnésium [55]. Sa structure biochimique est présentée en annexe 2 [56].

Dans la deuxième partie seront détaillées ses propriétés thérapeutiques supposées, au vue des essais cliniques réalisés et publiés.

3.1.8.4 Superoxyde dismutase

Les enzymes sont des catalyseurs de certaines réactions biochimiques. Comme les vitamines, elles sont altérées par la chaleur et détruites par la cuisson. La spiruline en renferme notamment une, laquelle joue un rôle de antioxydant primaire : la superoxyde dismutase (SOD) ; sa teneur est d'environ 1,5 millions d'unités / kg de spiruline sèche [54].

Les enzymes antioxydantes présentes normalement dans les cellules éliminent de façon permanente et efficace les radicaux libres primaires dès leur formation. Mais, dans certaines conditions (tabac, alcool, pollution...), l'organisme subit un stress oxydant et se laisse très vite dépasser par les radicaux libres primaires. Ceux-ci vont alors oxyder les constituants cellulaires et engendrer la formation de radicaux libres secondaires, capables de réactions d'oxydation en chaîne. Cette cascade de réactions conduit à la destruction des cellules, responsable de nombreuses pathologies dégénératives et de vieillissement précoce. Cet aspect est détaillé dans la deuxième partie (cf. 2.1.).

3.2 Synthèse des apports quantitatifs de la spiruline, en regard des apports recommandés

Les tableaux IX à XII indiquent la composition quantitative en nutriments et micro-nutriments de la spiruline, avec en parallèle les apports recommandés par les nutritionnistes.

Tableau IX : Composition moyenne globale de la spiruline [29]

protéines	65 % en poids
glucides	15 % en poids
lipides	6 % en poids
minéraux	7 % en poids (cendres totales <10)
fibres	2 % en poids
eau	5 % en poids (norme < 10)

L'étendue des valeurs acceptables pour les macronutriments (EVA) correspond aux intervalles recommandés relativement à la répartition de l'apport énergétique entre les différents éléments qui fournissent l'énergie (glucides, lipides et protéines) ; le but est de réduire les risques de maladies chroniques et de garantir un apport suffisant en nutriments essentiels. Ces intervalles sont exprimés en pourcentage de l'apport énergétique total.

Tableau X : Etendue des valeurs acceptables pour les macro-nutriments [36]

Age	Glucides totaux	Protéines totales	Lipides totaux	Acide linoléique (w6)	Acide α -linoléique (w3)
1-3 ans	45 à 65 %	5 à 20 %	30 à 40 %	5 à 10 %	0,6 à 1,2 %
4-18 ans	45 à 65 %	10 à 30 %	25 à 35 %	5 à 10 %	0,6 à 1,2 %
Adultes	45 à 65 %	10 à 35 %	20 à 35 %	5 à 10 %	0,6 à 1,2 %

Tableau XI : Composition de la spiruline en vitamines, et comparaison avec les apports recommandés selon l'âge [32][36]

Noms des vitamines	Teneur dans 100g de spiruline sèche	ANR ou AS (*) Nourrissons		ANR enfants		ANR adultes		ANR pendant la grossesse	ANR pendant la lactation
		0-6 mois	7-12 mois	1-4 ans	5-8 ans	hommes	femmes		
Vitamine A¹ = rétinol (μg)	11660 ¹	400*	500*	300	400	900	700	770	1 300
Vitamine B1 = thiamine (mg)	3,4 à 5	0,2*	0,3*	0,5	0,6	1,2	1,1	1,4	1,4
Vitamine B2 = riboflavine(mg)	3 à 4,6	0,3*	0,4*	0,5	0,6	1,3	1,1	1,4	1,6
Vitamine B3 = niacine (mg)	14	2*	4*	6	8	16	14	18	17
Vitamine B5 = acide panto- thénique (mg)	0,1	1,7*	1,8*	2*	3*	5*	5*	6*	7*
Vitamine B6 (mg) = pyridoxine	0,5 à 0,8	0,1*	0,3*	0,5	0,6	1,3	1,3	1,9	2
Vitamine B8 = biotine (μg)	5 à 10	5*	6*	8*	12*	30*	30*	30*	35*
Vit. B9 (μg) = acide folique	10	65*	80*	150	200	400	400	600	500
Vit. B12 (μg) = cyanocobalamine	100 à 340	0,4*	0,5*	0,9	1,2	2,4	2,4	2,6	2,8
Vitamine C = acide ascorbique (mg)	1,5 à 3	40*	50*	15	25	90	75	85	120
Vitamine E = alpha tocophérol (mg)	5 à 19	4*	5*	6	7	15	15	15	19

L'**apport nutritionnel recommandé (ANR)** est l'apport nutritionnel quotidien moyen permettant de combler les besoins nutritionnels de 98 % de sujets occidentaux en bonne santé, en fonction de l'âge et du sexe.

L'**apport suffisant (AS*)** représente l'objectif de consommation usuelle lorsqu'on ne peut pas fixer l'ANR pour un micro-nutriment donné.

¹ : la vitamine A est exprimée en équivalents d'activité du rétinol (EAR) ; or la spiruline ne renferme que des caroténoïdes, c'est à dire des précurseurs de la vitamine A.

Pour pouvoir faire une comparaison, il faut utiliser le facteur de conversion suivant :

$$1 \text{ EAR} = 1 \mu\text{g de rétinol} = 12 \mu\text{g de } \beta\text{-carotène.}$$

Comme 100g de spiruline sèche renferment environ 140 mg de β -carotène, cela correspond à une teneur moyenne en rétinol égale à 11 660 μg (soit 580 μg pour 5 g de spiruline).

Tableau XII : Composition de la spiruline en minéraux et oligo-éléments, avec en parallèle les apports recommandés selon l'âge [32][36]

Noms des minéraux et oligo-éléments	Teneur dans 100g de spiruline sèche	ANR ou AS (*) nourrissons		ANR enfants		ANR adultes		ANR pendant la grossesse	ANR pendant la lactation
		0-6 mois	7-12 mois	1-4 ans	5-8ans	homme	femme		
Calcium (mg)	100 à 700	210*	270*	500*	800*	1 000	1 000	1 000	1 000
Magnésium (mg)	200 à 300	30*	75*	80	130	420	320	350	310
Phosphore (mg)	670 à 900	100*	275*	460	500	700	700	700	700
Potassium (mg)	640 à 1 540	400*	700*	3000*	3800*	4700*	4700*	4 700*	5 100*
Sodium (mg)	200 à 450	120*	370*	1000*	1200*	1500*	1500*	1 500*	1 500*
Fer (mg)	60 à 180	0.27*	11	7	10	8	18	27	9
Zinc (mg)	2 à 60	2*	3	3	5	11	8	11	12
Sélénium (µg)	1 à 50	15*	20*	20	30	55	55	60	70
Cuivre (µg)	800	200*	220*	340	440	900	900	1 000	1 300
Chrome (µg)	280	0,2*	5,5*	11*	15*	35*	25*	30*	45*
Manganèse (mg)	2,5 à 3,7	0,003*	0,6*	1,2*	1,5*	2,3*	1,8*	2*	2,6*
Bore (mg)	8								
Molybdène (µg)	700	2*	3*	17	22	45	45	50	50
Nickel (µg)	300								
Vanadium (µg)	200								
Cobalt (µg)	150								

[les valeurs inscrites en **caractères gras** sont celles obtenues par enrichissements spécifiques des milieux de culture de la spiruline. Les cases correspondent à celles dont les valeurs ne sont pas encore déterminées par les nutritionnistes].

3.3 Préservation des nutriments et micro-nutriments jusqu'à la consommation

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

- la spiruline fraîche (biomasse pressée mais non lavée) est la forme optimale sur le plan qualitatif, mais elle ne se conserve que 6 heures au maximum à température ambiante, ou 2 à 3 jours à 4°C.
- la spiruline réduite en poudre, séchée et conditionnée dans un emballage bien fermé, à l'abri de l'humidité et de la lumière, conserve ses qualités nutritives d'avant séchage, pendant 5 ans [10] [29].

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 (maximum 8 %)
- protection contre la lumière
- protection contre l'oxygène

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

L'action combinée de la lumière et de l'oxygène est des plus dommageable : il est donc important de la conserver dans un conditionnement opaque et hermétique. Dans ces conditions, la spiruline séchée ne perd que très peu de sa valeur nutritionnelle, même après 4 ans de stockage [57].

Au moment de la production de spirulines, ce sont les procédés de séchage (par ailleurs souvent coûteux) qui risquent le plus d'altérer les vitamines qu'elle renferme. Lors du mini-colloque sur la production artisanale de spiruline (Mialet - 26 au 28 juin 2002), R. Fox a proposé une méthode de séchage qui semble prometteuse lorsqu'il s'agit de produire directement une préparation alimentaire contenant de la spiruline (une farine de sevrage par exemple) : c'est le « mix-drying » ; la pâte de spiruline fraîche contenant 80 % d'humidité est mixée avec la farine préalablement déshydratée et précuite par chauffage à 80°C. 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 et le développement de micro-organismes contaminateurs. Les essais réalisés sont encourageants et le pain à la spiruline ainsi obtenu est jugé « délicieux » [58].

3.4 Tolérance et acceptabilité alimentaire

3.4.1 Toxicité

Avec des décennies de recul concernant la consommation de spiruline par certaines populations, et, à l'issue des nombreuses études menées par des chercheurs spécialisés dans le domaine des cyanobactéries, il ressort que la spiruline (genre *Arthrospira*) n'est pas toxique, contrairement à la plupart des autres cyanobactéries [59][60][61]. Ces dernières produisent en effet un grand nombre de métabolites bioactifs, parmi lesquels des toxines : neurotoxines (anatoxine-A, β -N-méthylamino-L-alanine), hépatotoxines (microcystine) ou hématoxines, responsables de cas d'empoisonnements humain ou animal.

Mais, le genre *Arthrospira* ne possédant pas les gènes assurant la synthèse de ces toxines, la spiruline destinée à l'alimentation humaine a été autorisée à la vente depuis de nombreuses années dans les pays industrialisés. Aux Etats-Unis, la spiruline est classée "GRAS" (Generally Recognized As Safe) par la Food and Drug Administration (FDA). En France, le Comité Supérieur d'Hygiène Publique a donné, en 1984, un avis favorable pour la consommation humaine de toutes les spirulines [10].

En principe, les espèces toxiques de cyanobactéries (*Oscillatoria agardhii*, *Microcystis aeruginosa*, *Anabaena*, *Anabaenopsis*, *Aphanizomenon flos-aquae*...) vivent plutôt dans des habitats aquatiques dulcicoles ou marins et le milieu très alcalin dans lequel pousse la spiruline ne leur est pas favorable [5]. Néanmoins, la possibilité d'une contamination des spirulines par ces algues n'est pas écartée.

La commercialisation de spirulines destinées à la consommation par les êtres humains, doit s'entourer de garanties toxicologiques, notamment en mettant en avant l'absence d'autres cyanobactéries que le genre *Arthrospira* dans les conditionnements. Par exemple, si l'étiquette d'un produit porte une mention du type "algues bleu-vert", "super aliment bleu-vert" sans que le nom de "spiruline" n'y figure, alors il s'agit probablement d'une autre espèce de cyanobactérie, laquelle peut éventuellement contenir des toxines.

A côté de ce genre de contamination, il faut également envisager celle par les micro-organismes. Dans les milieux de culture, au pH élevé (> 9,5) où l'on travaille, la majorité des microbes dangereux pour l'homme sont normalement inactivés en deux jours.

Mais, lorsque le pH est inférieur à cette valeur (cultures jeunes à base de bicarbonate ou en cas de trop forte injection de CO₂), l'effet protecteur n'est plus assuré. Par ailleurs, il existe un risque que certains microbes pathogènes introduits dans des cultures de spiruline (suite au non respect des règles d'hygiène) deviennent résistants aux pH élevés ; cela a pu être vérifié [29].

Les cultures contiennent également des microbes biodégradeurs adaptés au milieu de culture : ils jouent un rôle bénéfique à côté du zooplancton, en purifiant le milieu et en recyclant des nutriments, tout en aidant à éliminer l'oxygène et en fournissant du gaz carbonique.

Enfin, des germes de moisissures existent systématiquement dans les cultures puisque des moisissures apparaissent régulièrement sur le flottant laissé longtemps sans agitation ; l'analyse bactériologique décèle couramment entre 5 et 500 colonies/g, sans qu'aucune norme n'ait été imposée dans la plupart des pays [29].

La forte capacité de la spiruline à fixer certains polycations (cadmium, plomb, chrome, cuivre) nécessite d'effectuer des contrôles sur les teneurs en métaux lourds des spirulines destinées à la consommation humaine.

Lorsque la spiruline est récoltée en milieu naturel, on a par exemple retrouvé des teneurs élevées en arsenic et fluor [5][10].

L'accumulation de métaux lourds dans la spiruline peut être liée à la composition géologique du lieu de récolte ou au fait que son environnement de culture soit pollué.

Sur un plan théorique, les métaux lourds présents dans les milieux de culture de spiruline pourraient aussi constituer un risque de toxicité si leur teneur venait à dépasser un certain taux. Le tableau XIII indique les limites en métaux lourds et bactéries exigées pour la commercialisation des spirulines alimentaires en France [5].

Tableau XIII : Normes imposées en France pour la contamination des spirulines alimentaires en bactéries et métaux lourds (selon l'Arrêté du 21/12/1979) [5]

Type d'agent contaminant	norme admise
métaux lourds	sur poids sec, en ppm (mg/kg)
arsenic	≤ 3
plomb	≤ 5
étain	≤ 5
cadmium	≤ 0,5
mercure	≤ 0,1
iode	≤ 5 000
bactéries	sur produit frais ou sec
germes aérobie (30°C)	≤ 100 000 par gramme
coliformes fécaux (44,5°C)	< 10 par gramme
anaérobiesulfito-réducteurs (46°C)	< 100 par gramme
<i>Clostridium perfringens</i>	≤ 1 par gramme
<i>Salmonella</i>	absence dans 25 grammes
<i>Staphylococcus aureus</i>	≤ 100 par gramme

Concernant l'éventualité de la présence de toxiques organiques, mutagènes et/ou tératogènes, des études ont été effectuées dans le passé.

Les éventuelles propriétés toxiques des paraffines contenues dans la spiruline ont été étudiées sur le rat et le porc par J.Tulliez et al.[62]. La rétention de l'heptadécane (constituant majeur de ces paraffines) 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, les auteurs de l'étude déclarent qu'aucune toxicité aiguë ou chronique n'est à craindre.

Le 3-4-benzopyrène a été dosé dans la spiruline car il constitue un bon indicateur de la présence des hydrocarbures polycycliques aromatiques, connus pour leurs pouvoirs mutagènes et cancérigènes. Les quantités observées se sont révélées bien en dessous de ce que l'on retrouve dans la plupart des légumes courants [60].

Aucune tératogénicité n'a été observée chez trois espèces animales, à quatre étapes de gestation différentes, avec des concentrations de spiruline égales à 10, 20 et 30 % de la diète.

De même, aucun effet mutagène ou de toxicité subaiguë ou chronique n'a été décelé [62][63].

3.4.2 Réactions allergiques

Avec le recul, on peut constater que contrairement à la majorité des aliments courants, la spiruline ne semble pas provoquer de réactions allergiques, que ce soit par ingestion ou par contact. L'étude clinique menée par Yang en 1997 [64] va dans le même sens (cf. deuxième partie 2.2.). Après plus de trente ans de production industrielle ou artisanale, aucun accident alimentaire attribuable directement ou non à sa consommation ou à sa production n'est à déplorer [30].

3.4.3 Risques de surdoses

Il n'existe à ce jour aucun cas de surdose en spiruline documenté dans la littérature scientifique. Des consommateurs de plus de 10 g par jour pendant plusieurs années consécutives ne rapportent aucun effet négatif.

En ce qui concerne un éventuel risque de toxicité aiguë, aucune donnée ne fixe une limite de consommation ; des consommateurs anecdotiques de plus de 100 g par jour n'ont décelé, en effet, aucune conséquence néfaste particulière [10]. *A priori*, le seul indice témoignant d'une forte consommation de spiruline est la légère coloration orangée de la peau, particulièrement visible au niveau de la paume des mains. Ce phénomène, lié à l'accumulation bénigne de caroténoïdes dans la peau, est néanmoins parfaitement réversible.

L'apport maximal tolérable (AMT) est l'apport quotidien continu le plus élevé qui ne comporte vraisemblablement pas de risques d'effets indésirables pour la santé chez la plupart des individus, en fonction de l'âge et du sexe.

Le tableau XIV met en parallèle la quantité moyenne des micro-nutriments susceptibles d'être toxiques à haute dose, retrouvée dans 5 g de spiruline, et, l'AMT de ces éléments [36]. On peut constater effectivement qu'une consommation, même abusive, de spiruline n'engendre pas de toxicité.

Tableau XIV : Apports maximaux tolérés concernant les principaux micro-nutriments contenus dans la spiruline [36]

Micro-nutriments	Teneur dans 5 g de spiruline sèche	AMT Nourrissons		AMT enfants		AMT adultes		AMT pendant la grossesse	AMT pendant la lactation
		0-6 mois	7-12 mois	1-4 ans	5-8 ans	homme	femme		
Vitamine A (μg)	—	600	600	600	900	3 000	3 000	3 000	3 000
Vitamine E (mg)	0,25 à 0,95	ND	ND	200	300	1 000	1 000	1 000	1 000
Fer (mg)	3 à 9	40	40	40	40	45	45	45	45
Zinc (mg)	0,1 à 3	4	5	7	12	40	40	40	40
Sélénium (μg)	0,05 à 2,5	45	60	90	150	400	400	400	400

Les valeurs inscrites en **caractères gras** correspondent aux teneurs obtenues par enrichissement spécifique des milieux de culture de la spiruline. L'abréviation ND signifie que les valeurs n'ont pas été déterminées.

3.4.4 Précautions d'emploi

La dose courante de spiruline utilisée comme complément alimentaire (en dehors des états de malnutrition sévère) se situe aux alentours de 3 à 5 g par jour. En lien direct avec ses propriétés détoxifiantes (cf. deuxième partie **2.3**), lorsque les dosages de départ sont trop élevés, des symptômes tels que des troubles gastro-intestinaux et/ou des céphalées peuvent survenir.

Les sociétés commercialisant la spiruline conseillent donc de commencer par une dose de 1 g/j et d'augmenter progressivement par palier de 1 g tous les trois jours, jusqu'à la dose quotidienne souhaitée [65].

De plus, la spiruline pouvant exercer un effet stimulant chez certaines personnes, il est préférable de ne pas en prendre le soir.

Par ailleurs, les personnes souffrant de phénylcétonurie doivent éviter la spiruline car, comme tous les aliments renfermant des protéines, elle contient de la phénylalanine. Aucune interaction médicamenteuse n'a été signalée jusqu'alors.

3.4.5 Acceptabilité par les consommateurs

L'acceptabilité alimentaire de la spiruline a longtemps constitué un contre-argument systématique à son introduction dans les programmes nutritionnels. L'intensité de sa couleur verte et son grand pouvoir colorant sur les autres aliments l'empêche d'être dissimulée au sein d'une préparation culinaire. A côté de la couleur, les objections portent aussi sur le goût et l'odeur.

Certes, la spiruline fraîchement récoltée ne présente pratiquement aucun arôme ni goût ; c'est donc à ce moment là qu'elle est le plus agréable à consommer. Mais, pour se conserver, elle doit être séchée et réduite en poudre ou en granulés fins. Or, sous cette forme, elle dégage une odeur spécifique rappelant celle du foin ou du poisson séché. Elle présente également un goût salé, ce qui explique son utilisation comme exhausteur de goût. Dans le contexte culturel européen, il apparaît donc évident qu'elle ne peut être du goût de tous. Il est de toute façon toujours plus difficile pour des adultes (par rapport aux enfants), d'accepter des nourritures nouvelles : le fait d'avoir associé pendant des années certains goûts, odeurs et couleurs à ce qui est « bon », handicape l'introduction d'un nouvel aliment quel qu'il soit.

Afin d'augmenter le nombre de consommateurs dans les pays industrialisés, des essais préliminaires ont donc été réalisés. Leur but consistait à déterminer les quantités de spiruline nécessaires à l'enrichissement de divers aliments, sans pour autant en modifier leur goût. Ainsi, il est possible d'ajouter 1g de spiruline dans la plupart des aliments qui accompagnent la consommation de spiruline, sans que leur saveur initiale ne soit altérée ; les pâtes tolèrent jusqu'à 2,5 g [30].

Dans l'un de ses ouvrages [66], R. Fox fait remarquer que l'ajout de quelques grammes de sucre vanillé en poudre (pour 1 kg de spiruline séchée), masque le goût et l'odeur de la spiruline, sans que l'on sente le goût et l'odeur de vanille.

Heureusement, son utilisation comme complément alimentaire dans la lutte contre la malnutrition (cf. troisième partie) pose moins de problèmes à ce niveau. Cela s'explique notamment par le fait qu'on retrouve, avec d'autres ingrédients des cuisines asiatiques et africaines, des odeurs comparables à celle de la spiruline séchée. Après un premier effet de surprise, les enfants en bas âge malnutris l'acceptent finalement très facilement.

Par ailleurs, les régions les plus touchées par la malnutrition sont aussi celles où l'introduction de spiruline dans l'alimentation est la plus aisée, du fait de la nature des plats traditionnels. Par exemple, en Afrique, elle est incorporée dans la sauce qui accompagne les bouillies de céréales ; en Inde, elle est ajoutée aux boissons, biscuits et friandises traditionnels.

3.4.6 Modes de consommation

3.4.6.1 Dans les pays en voie de développement

La spiruline ne remplace pas les aliments caloriques tels que le manioc, le riz, le blé, la pomme de terre ou le maïs, mais c'est un ingrédient idéal de la sauce protéinée qui accompagne la "boule" africaine ; elle permet ainsi d'apporter non seulement ses protéines, mais les nombreux autres éléments très favorables à la bonne santé de tous et notamment des jeunes enfants. Depuis quelques années, diverses formulations de farines de sevrage contenant de la spiruline sont apparues dans plusieurs pays [67] :

➤ Farine XEWEUL (Sénégal) :

- 55 % de mil
- 18 % d'arachide
- 14 % de niébé
- 10 % de sucre
- 3 % de spiruline

Dose recommandée : 100g/j Prix indicatif (2005) : ≈ 1,30 €/kg
--

[XEWEUL signifie « tout ce qui est bénit, ce qui est bon »].

➤ Farine SOSPISOMA (République Démocratique du Congo)

- 44 % de maïs
- 22 % de sorgho
- 22 % de soja
- 10 % de sucre
- 2 % de spiruline

Dose recommandée : 100g/j Prix indicatif (2006) : ≈ 1 €/kg

➤ Farine MISOLA + spiruline (Burkina-Faso)

- 60 % de petit mil grillé (ou 30% de riz + 30% de maïs)
- 20 % de soja grillé
- 10 % d'arachide grillé
- 9 % de sucre
- 5 % de spiruline
- 1 % de sel

Dose recommandée : 200g/j Prix indicatif (2005) ≈ 1,20 €/kg
--

Au Tchad, dans les régions où *Arthrospira platensis* pousse naturellement, sa consommation est ancienne et régulière : les femmes des villages la récoltent et la font sécher au soleil dans des cuvettes de sable construites pour la circonstance [68]. Le produit en forme de galette ainsi obtenu s'appelle le *Dihé* ; il est ensuite transformé pour pouvoir être utilisé sous forme de sauce. La sauce au *Dihé* seul renferme de l'eau, de l'huile, de la poudre de gombo et de tomate séchés, de l'oignon, du sel, un cube "Maggi" et 9 à 10 g de spiruline par personne. Trois autres types de sauce sont également consommées, selon que la sauce au *Dihé* est agrémentée de haricots, de poisson séché ou de viande.

Voici un autre exemple de recette de garniture à ajouter à un plat de céréales (riz, millet, sorgho) ; pour la réaliser, il faut faire revenir une gousse d'ail et deux oignons émincés, avec des baies roses, du poivre vert et un soupçon de piment. Ensuite, lorsque ce mélange est cuit, on y ajoute une cuillère à soupe de spiruline dissoute dans un peu d'eau. Il ne reste plus alors qu'à mixer et verser la purée obtenue sur le plat de céréales cuites.

3.4.6.2 Dans les pays riches

Il est possible de consommer la spiruline en assaisonnement de salades, de bouillons, de sauce tomate ou de soupes. Elle peut aussi assaisonner les plats cuisinés, en fin de cuisson.

L'industrie alimentaire propose, à l'heure actuelle, de nombreux produits enrichis en spiruline : tagliatelles, soupes instantanées, gelées, pâte à tartiner, barres énergétiques, crèmes glacées, desserts chocolatés, gâteaux, boissons fermentées, yaourts, bonbons, aliments diététiques pour régimes hyperprotéinés...[69].

La spiruline séchée se présente sous la forme d'une poudre de couleur vert foncé ; sa granulométrie est fine puisque le diamètre des particules est compris entre 9 et 25 μm [5]. Cela permet de la mélanger facilement dans de la purée, des sauces ou du fromage blanc. Pour une utilisation lors de la préparation d'une boisson, il est nécessaire de bien remuer le liquide de base et de verser progressivement la spiruline dans ce liquide en mouvement.

Néanmoins, dans les pays riches, ces modes de consommation restent rares. La spiruline y est plutôt utilisée sous forme de poudre, comprimés, granulés ou gélules (cf. deuxième partie 1.1.1.).

En guise d'illustration, voici quelques idées de recettes (figures 5a, 5b, 5c, 5d [70] [71] :

Jus de fruits pour petits déjeuners complets :

Préparation pour 2 personnes : mélanger une cuillère à café de spiruline à 500 ml de jus de pomme, d'orange ou d'ananas. Y ajouter des fruits frais comme des pêches, des poires, des pommes, de l'ananas, des bananes, des oranges ou des baies. On peut aussi y incorporer des ingrédients comme des amandes ou des graines de tournesols, ou des parfums comme la vanille ou le citron vert.

Pour une boisson fouettée plus épaisse, il est possible de mettre de la glace ou d'utiliser plus de fruits et moins de jus. Bien mixer la préparation avant consommation.

Milk shake aux fruits :

Ingrédients :

- 2 pêches ou 150 g de fraises ou 1 banane ou 3 abricots (selon la saison)
- 1 /2 litre de lait de soja vanillé ou de lait de riz
- 1 c. à café de spiruline
- cannelle (facultatif)

Mixer le tout avant de déguster.



Figure 5a : Milk shake à la spiruline. © Algosopnette

Cake à la spiruline :

Ingrédients :

- 4 cuillères à soupe de Spiruline
- 150 g de farine
- 3 oeufs
- 10 cl de lait
- 1 cuillère à soupe d'huile d'olive
- 1 pincée de sel
- 1 sachet de levure
- quelques dés de jambon
- quelques olives

Préparation :

Laisser gonfler la spiruline séchée dans un demi verre d'eau, jusqu'à obtenir une pâte homogène. Mélanger à part la farine, les oeufs, le lait, l'huile et le sel. Ajouter la levure et la spiruline gonflée puis mélanger. Ajouter le jambon et les olives coupées en rondelles. Faire cuire à thermostat 6. [à noter que du fait de la cuisson, la spiruline perd une partie de ses qualités nutritionnelles].



Figure 5b : Cake à la spiruline. © Algosopnette

Sauce guacamole à la spiruline :

Ingrédients : 2 avocats, jus d'un citron, 2 c. à café d'ail, 3 c. à café de spiruline, 1 tomate, ½ oignon, 2 c. à café de sauce au chili, sel et poivre.

Mixer le tout avant de déguster.

La consistance épaisse est idéale pour les apéritifs.



Figure 5c : Sauce guacamole à la spiruline. © Algosopnette

Taboulé à la spiruline :

Pour 4 personnes : faire tremper 6 cuillères à soupe de semoule spéciale couscous, une heure dans de l'eau froide, bien égoutter. Hacher ensemble 2 ou 3 échalotes, 1 oignon, 1 concombre, 2 tomates (qu'on aura préalablement ébouillanté pour les éplucher plus facilement), 1 petite poignée de feuilles de menthe et une cuillère à café de spiruline, puis mélanger à la semoule. Servir frais.



Figure 5d : Taboulé à la spiruline. © Algosopnette

Pour plus d'idées, un recueil de recettes a été édité et publié en 2001 par B. Sisso [72]. Peintre et professeur de yoga, cette femme consomme de la spiruline depuis 1978 et affirme que sa très bonne santé et son énergie quotidienne sont liées à cette consommation. Elle organise des stages de dégustation, de façon à faire connaître la spiruline.

4. Différents moyens d'obtenir de la spiruline

En dehors de la "cueillette" de la spiruline issue des lacs où elle pousse naturellement, la spiruline doit être produite si on veut couvrir la demande. Or, le seul moyen de la produire en grande quantité est la culture en bassins.

En fonction de la surface totale d'exploitation des bassins et des moyens technologiques utilisés, on distingue la culture familiale, la culture artisanale et la culture industrielle. Pour fixer les idées, la production quotidienne est quantifiée en grammes dans le cadre d'une culture familiale, en kilogrammes dans le cadre d'une culture artisanale et en tonnes dans le cadre d'une culture industrielle.

Les photobioréacteurs sont surtout utilisés pour la production de biomasse très pure, afin d'en extraire des molécules à haute valeur ajoutée ; ils ne sont pas adaptés à la culture de masse.

4.1 Exploitation des ressources naturelles

L'exploitation des lacs où pousse naturellement la spiruline constitue un moyen d'en obtenir. Mais, il ne faut pas pour autant les surexploiter. La spiruline qui s'y trouve a, en effet, plusieurs utilités :

- nourrir des enfants en état de malnutrition ;
- faire vivre les flamants qui se trouvent dans ces lacs ;
- servir de réservoir de souches de spiruline naturelle, utilisables pour débiter et maintenir les cultures de fermes commerciales de spiruline.

De quelle façon ces lacs peuvent-ils être exploités ?

Il est possible de pomper l'eau du lac, de l'envoyer directement sur les tamis de récolte et de sécher la bouillie de micro-algue au soleil. C'est la méthode la plus simple, la moins chère et la plus rapide à mettre en place. Certes, le produit obtenu est comestible et consommable, mais sa qualité n'est pas suffisante pour être commercialisé. D'autre part, par cette méthode, l'écosystème est menacé.

Une méthode plus raisonnable consiste donc à construire des bassins près du lac, à y envoyer l'eau filtrée puis à renvoyer au lac l'eau usée. Ce système permet d'obtenir un produit de haute qualité pour la consommation humaine (filtration avec filtre de 50 μm avant l'arrivée dans les bassins) et également une récolte d'algues moins pure (filtre 150 μm), utilisable pour l'aviculture ou l'aquaculture, tout ceci sans déranger l'écosystème. Cette méthode nécessite la construction d'un réservoir en béton de 60 m^2 pour chaque surface de production égale à 3 000 m^2 . L'eau pompée du lac arrive dans le réservoir, puis passe par gravité dans un filtre à sable avant d'arriver dans les bassins artificiels de culture de spiruline [5].

4.2 Cultures familiale et artisanale

4.2.1 Paramètres influençant la réussite des cultures de spiruline

4.2.1.1 Facteurs climatiques

➤ La **température**

La spiruline pousse idéalement lorsque la température du milieu de culture est de 37°C. Des températures supérieures à 40°C ne lui conviennent pas, et, elle meurt lorsqu'elle est exposée à 43°C. Par ailleurs, à 20°C, sa croissance est pratiquement nulle [29].

Néanmoins, le handicap d'un climat trop froid peut être compensé artificiellement par la construction de bassins sous serre. Ce système est même particulièrement intéressant car il constitue aussi une protection contre l'évaporation, les insectes, les poussières et les pluies diluviennes, lesquelles peuvent engendrer une dilution du milieu de culture ou une perte de milieu par débordement des bassins.

➤ La **pluviométrie**

La conduite de bassins de culture nécessite un minimum de ressources en eau. Les eaux de pluie sont intéressantes car propres et minéralement neutres. La teneur en eau du milieu doit impérativement être constante. Le manque ou l'excès d'eau sont néfastes. Sous les climats à faible pluviométrie, ou à saison sèche longue, il est donc nécessaire de prévoir une citerne pour stocker de l'eau de pluie, laquelle sert à compenser l'évaporation des bassins. A l'inverse, dans les régions à fortes précipitations, la présence d'une couverture translucide au-dessus des bassins doit permettre d'éviter une dilution du milieu de culture.

➤ La **saison** et l'**ensoleillement**

La culture de spiruline est le plus souvent saisonnière. En effet, dans les régions tempérées, l'hiver est généralement trop froid pour cultiver la spiruline (sauf avec chauffage et éclairage artificiel trop coûteux).

Même dans des régions chaudes, un arrêt peut être rendu nécessaire par l'importance des pluies, de la sécheresse ou des vents de sable à certaine saison.

Le climat idéal est donc celui où il ne fait jamais froid et où les pluies sont harmonieusement réparties, de façon à compenser l'évaporation, comme par exemple certains points du versant Est des Andes. Un autre type de climat idéal est le désert au pied de montagnes qui assurent un large approvisionnement en eau, comme par exemple le désert d'Atacama au Chili [66].

4.2.1.2 Facteurs concernant les bassins de culture

➤ Localisation

Le lieu d'implantation des bassins ne doit pas se faire au hasard mais après mûre réflexion. En effet, il faut respecter quelques règles *a priori* pas toujours évidentes : ne pas construire les bassins sous des arbres (besoin d'ensoleillement), ni en un lieu inondable, ni près d'une route ou d'une industrie (pollution). Eviter aussi la proximité de certains éléments comme les haies, barres rocheuses, forêts, etc. qui peuvent entraîner des conséquences importantes sur le microclimat.

Le terrain du site choisi pour la construction des bassins doit être aménagé avant toute chose (épierrage, nivellement du sol, confection d'une dalle en ciment). Le site doit être facilement accessible mais clôturé pour prévenir des interventions extérieures (curiosité sur le contenu des bassins, vol du matériel et des matériaux etc.) [73].

Il est également préférable d'avoir une source d'eau à proximité des bassins. Certes la croissance de la spiruline ne requiert que peu d'eau, mais les lavages sont abondants (nettoyage des toiles de filtration, des ustensiles utilisés, lavage des bassins en cours de rénovation, etc.). De plus, la propreté du matériel et du personnel de production doit être irréprochable pour limiter les risques de contamination des cultures.

Le site doit être assez spacieux pour accueillir non seulement les bassins mais aussi les locaux adjacents. Il faut en effet prévoir :

- des allées de circulation entre les bassins ;
- un local pour le stockage des matériaux et des produits chimiques (intrants) ;
- un local pour les pesées, les analyses et les contrôles, le conditionnement et la tenue des registres de production ;
- un emplacement pour les séchoirs solaires ;
- un autre local pour un séchoir chauffé au gaz (précaution élémentaire durant la saison des pluies car la spiruline produite serait perdue faute de pouvoir être séchée).

Tous ces locaux peuvent évidemment être regroupés dans un même édifice.

➤ Mode de construction

Les bassins en dur (figure 6) sont faits avec du béton renforcé, du ciment, des pierres cimentées, des parpaings, des briques, du banco etc. Ce sont les plus durables (durée moyenne de 10 ans) et les plus faciles à nettoyer, mais aussi les plus chers. L'idéal est de les construire sur une dalle en béton armé de 10 cm d'épaisseur minimum, coulée sur un terrain bien compacté.

Les bassins en bois-plastique (figure 5) existent aussi : le sol nivelé est recouvert avec un film plastique et les montants sont constitués par un cadre en bois (planches, panneaux, lattes, tasseaux) supportant une bâche plastique de forte épaisseur. En principe, au bout de trois ans, ils exigent des réparations voire un remplacement total.

Les bassins en argile constituent une solution faite de mieux : il s'agit d'une excavation ceinturée par un muret en terre compactée rendue étanche par de la glaise, par des briques cuites ou par un film plastique. La spiruline pousse très bien dans ces bassins mais sa pureté bactériologique doit être surveillée de plus près ; il y a, en effet, un risque accru de présence de micro-organismes anaérobies au fond. En général, leur étanchéité est améliorée par l'utilisation d'un film plastique.

Globalement, il faut retenir que les bassins sans garniture intérieure ne sont pas satisfaisants, car on retrouve des grains de sable fin ou des particules d'argile dans le produit fini, du fait de l'agitation. C'est pourquoi la dalle en ciment ou en béton est fortement conseillée [29] [74].

Concernant la physionomie des bassins, il est recommandé qu'ils soient de forme arrondie et sans angles vifs. Leur fond doit être aussi plan que possible, avec une légère pente vers un endroit plus creux d'accès facile pour faciliter la vidange. L'expérience montre que la profondeur idéale est comprise entre 20 et 40 cm. Par ailleurs, les bords du bassin doivent être surélevés par rapport au niveau du terrain, de façon à limiter l'entrée des poussières et des petits animaux.

➤ **Nombre et surface unitaire**

Dans le cadre d'un projet de culture artisanale, l'installation doit comprendre deux sortes de bassins : ceux servant pour l'ensemencement et ceux réservés à la production proprement dite [75].

Les premiers sont petits (2 à 4 m²) et de forme ronde ou rectangulaire ; au nombre de deux ou trois, ces bassins d'ensemencement ont un rôle primordial dans la survie d'une culture. Ils permettent en effet de faire croître la micro algue à partir d'une quantité modeste de spiruline souche, en la repiquant dans des volumes de plus en plus grands ; il arrive un moment où les cuvettes, bassines, et containers utilisés au départ ont besoin d'être relayés par des volumes dépassant les 100 litres. Ce type de bassin permet aussi de conserver une partie de la spiruline, en cas de pollution des bassins de production [76].

En ce qui concerne les bassins de production, ils sont rectangulaires et leur surface varie généralement entre 30 et 50 m². La largeur maximale conseillée est de 3 à 4 m ; cette largeur est volontairement limitée afin de toujours pouvoir pratiquer une agitation manuelle, par exemple en cas de panne d'électricité empêchant les autres dispositifs d'agitation de fonctionner. La longueur moyenne de ces bassins est comprise entre 8 et 15 m [76].

Les personnes ayant des années d'expérience dans ce domaine signalent qu'il est préférable de construire deux ou plusieurs petits bassins de production plutôt qu'un seul grand : cela permet d'en vider un (pour le nettoyer ou le réparer par exemple) sans perdre son contenu. De plus, si une des cultures d'un bassin venait à être contaminée ou à mourir, un autre bassin permettrait de continuer et de réensemencer.

En pratique, le coût d'investissement au m² décroît quand augmentent la surface unitaire et le rapport surface/périmètre des bassins [29].

En revanche, des bassins étroits (largeur inférieure à 3 m) sont plus faciles à agiter et à couvrir (figures 6a et 6b).

Pour une culture familiale (ou destinée à un dispensaire), les spécialistes recommandent que la surface unitaire soit comprise entre 5 et 20 m². Cette surface de bassin permet d'obtenir une production allant de 15 à 80 g de spiruline par jour.

A titre indicatif, voici les surfaces requises pour les autres types de production de spiruline [29] :

- 50 à 100 m² pour une production artisanale ;
- 1 000 m² et plus pour une production semi-artisanale ;
- 5 000 m² maximum pour une production industrielle.



Figure 6a (à gauche) et 6b : La photo de gauche montre un bassin en bois-plastique de 7m², installé à Pahou (Bénin) ; l'homme est en train d'agiter le milieu de culture de spiruline, à l'aide d'un balai. Sur la photo de droite, c'est un bassin en béton de 33 m², en cours de construction. Sa largeur est de 3 m, ce qui rendra l'agitation manuelle possible. © TECHNAP/CREDESA 2001.

➤ Couverture

Il est souvent utile, voire nécessaire, d'installer une serre ou au moins un toit sur le bassin (figure 7a) : cela permet de le protéger contre les excès de pluie, de soleil ou de froid, et contre les chutes de feuilles, fientes d'oiseaux, vents de sable et débris divers, tout en lui permettant de "respirer".

Le toit peut être en toile de tente blanche ou en tissu polyamide enduit PVC blanc laissant passer une partie de la lumière mais capable d'arrêter suffisamment la pluie. Il peut aussi être en plastique translucide : film de polyéthylène traité anti-UV utilisé pour la construction des serres horticoles [29]. Si le toit est opaque, il faut le mettre suffisamment haut pour que le bassin reçoive assez de lumière par les bords. Il est souvent utile de compléter le toit par une moustiquaire sur les côtés.

L'installation d'une serre (figure 7b) consiste à recouvrir le bassin d'un film translucide avec une pente de 4 % et une tension suffisante pour éviter la formation de poches d'eau en cas de fortes pluies.

Les films utilisés doivent être stabilisés contre les rayons UV et ne pas poser de problème de sécurité alimentaire. Des orifices d'aération et/ou d'accès doivent être prévus, ainsi qu'un dispositif d'ombrage [29][73].

A noter que la culture sous serre offre certains avantages :

- Ombrable et aérable, la serre est idéale quel que soit le climat ; elle permet un contrôle de la température, de la lumière, de la pluie, de l'évaporation, ainsi que celui des insectes, autres animaux, poussières et feuilles mortes. C'est la protection la plus efficace pour réduire la consommation d'eau en climat aride.
- Suffisamment étanche, le bassin peut alors être alimenté en gaz carbonique provenant de la combustion d'un gaz ou de la fermentation d'un compost.
- En cas d'infestation de la culture par des larves, il est facile de laisser monter la température à 42-43°C, le temps de les tuer.



Figures 7a (à gauche) et 7b : La photo de gauche montre un bassin de culture de spiruline recouvert d'un toit ; sur celle de droite, on peut voir une serre recouvrant un bassin de 20 m² à Mialet (Gard).
© TECHNAP/CREDESA 2001.

➤ Systèmes d'agitation

Une exposition directe à un fort soleil provoque la photolyse des filaments de spiruline. Mais, en diminuant l'intensité lumineuse, on diminue aussi la photosynthèse totale. L'agitation du milieu de culture constitue un bon moyen d'éviter la photolyse sans modifier l'intensité lumineuse, en mettant alternativement les filaments à la lumière et à l'ombre.

L'agitation permet également de s'assurer que les filaments ne restent pas dans des micro-zones où les éléments nutritifs essentiels sont épuisés. Elle empêche aussi la formation d'amas de spiruline suite à l'emmêlement de leurs filaments ; c'est important car, à l'intérieur de ces amas, les filaments ne voient pas la lumière et les bactéries ont tendance à proliférer.

Par ailleurs, l'agitation permet aussi d'améliorer l'élimination de l'oxygène.

Les agitations peuvent se faire manuellement, avec un balai ou une rame, ou grâce à des pompes n'endommageant pas les spirulines (pompes à hélice, vis, palettes, diaphragme ou vortex) [29][77].

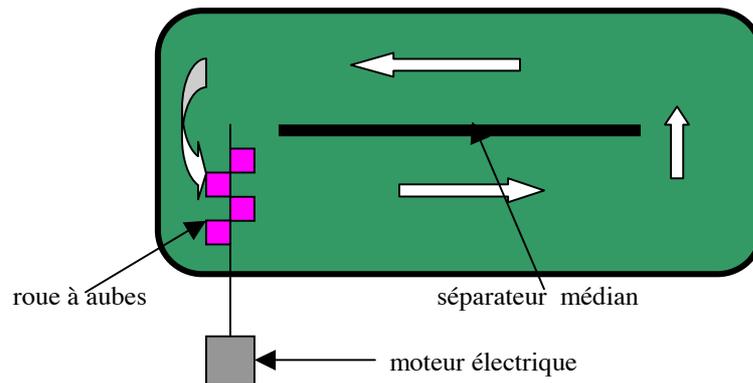
En cas d'agitation par une pompe immergée, un débit de 1 à 2 m³/h, peut suffire pour des bassins de 10 à 15 m². Des surfaces de bassin plus grandes nécessitent des pompes plus puissantes qui risqueraient de casser la spiruline. Il vaut mieux alors faire appel à un brassage par roue à aubes (figures 8 et 9) :

dans ce cas, un moteur électrique entraîne un axe sur lequel sont placées des pales. A chaque tour, les pales plongent dans le bassin sur une profondeur d'environ 10 à 15 cm et font avancer la veine liquide correspondante. Le moteur utilisé ne doit pas tourner à plus de 30 à 40 tours/minute. Il est donc nécessaire de prévoir une grande démultiplication de la vitesse de rotation du moteur. Dans son ouvrage, J.P Jourdan signale que des moteurs d'occasion, en provenance de machines à laver le linge mises au rebut, sont bien adaptés car ils sont souvent très robustes et tournent lentement (350 à 400 t/min). La démultiplication peut être obtenue en faisant appel à des pièces de bicyclette : un petit pignon fixé sur l'axe du moteur et une transmission par chaîne font tourner une roue de vélo solidaire de la roue à aubes [77].



(Photo Peter Schilling)

Figure 8 : Système d'agitation d'un bassin par roue à aubes [78].



Le séparateur médian installé dans l'axe du bassin permet de réaliser une circulation en hippodrome. Les flèches indiquent le sens du liquide en agitation : on voit bien que la cloison centrale oblige le retour du liquide par l'autre bras de l'hippodrome.

Figure 9 : Schéma indiquant le principe d'agitation par roue à aubes dans un bassin muni d'un séparateur médian [77]

Comme le montre la figure 9, lorsque l'agitation est assurée par une roue à aubes (ou une pompe), une chicane médiane facilite la circulation. Cependant, l'idéal pour ne créer aucun espace mort dans le bassin, est de compléter cette chicane par des chicanes d'angles capables de rediriger les flux depuis les bords vers le centre. Ce système est plutôt utilisé lorsque les bassins ont une surface plus importante et dans le cadre des cultures industrielles, car il complique l'installation.

Par ailleurs, la fréquence d'agitation est aussi un paramètre important. L'ensemble des spécialistes affirme qu'une **agitation discontinue énergique** est préférable à une agitation continue mais faible. En effet, l'agitation énergique est toujours plus efficace quand elle est intermittente, car, à chaque redémarrage il se produit un brassage, alors qu'en continu la masse d'eau a tendance à se déplacer d'un bloc (sauf si des chicanes sont installées en travers du courant).

L'agitation au balai une fois par jour au minimum constitue une bonne pratique, notamment lorsque le bassin est assez profond.

4.2.1.3 Facteurs liés au milieu de culture

Il s'agit essentiellement de la composition de ce milieu, de son entretien et de son stockage. Ces paramètres sont étudiés dans le paragraphe 4.2.2.

4.2.2 Démarrage et conduite des cultures

La culture de spiruline se divise en six grandes étapes successives :

- 1) Choix du lieu d'implantation des bassins (cf. 4.2.1.2)
- 2) Construction des bassins (cf. 4.2.1.2)
- 3) Elaboration du milieu de culture initial

Les spirulines vivent dans une eau à la fois salée et alcaline. L'eau utilisée pour le milieu de culture doit être potable sans sentir le chlore. Pour ce qui est de la quantité d'eau nécessaire pour la constitution du milieu initial, il est important de savoir par exemple, qu'une surface totale de culture de 1 000 m² exige 200 m³ d'eau.

Les eaux trop dures sont à éviter car elles peuvent gêner la culture en formant des boues minérales, surtout lorsque l'ensemencement initial en spiruline n'est pas assez concentré [79][80].

En général, les eaux de pluie, de source ou de forage conviennent bien.

La salinité est apportée par les produits chimiques servant d'engrais (à l'exception de l'urée, ce sont des sels) et complétée par du chlorure de sodium.

L'alcalinité est apportée sous forme de bicarbonate de sodium ou, à défaut, à partir de soude caustique ou de carbonate de sodium, lesquels vont se bicarbonater lentement au contact de l'air.

En pratique, la composition des milieux de culture est variable, en fonction de la disponibilité ou du prix d'achat des produits chimiques nécessaires à leur élaboration [79].

Les limites de salinité et d'alcalinité permises sont assez larges mais, pour des raisons d'économie et de productivité, on fait en sorte de respecter les valeurs minimales nécessaires.

Concernant l'alcalinité, le pH initial du milieu doit être assez élevé (entre 7,8 et 8,5). Le pH d'une culture florissante doit ensuite se situer entre 9,5 et 10,5. Il faut savoir que lorsque le pH dépasse 10,5, le CO₂ apporté est insuffisant pour compenser le prélèvement par la spiruline et sa croissance est donc limitée par le manque de CO₂. Un apport de CO₂ permet alors d'abaisser le pH tout en fournissant du carbone pour continuer la croissance de la spiruline.

La salinité, correspondant à la somme des poids de tous les sels dissous dans le milieu, doit être au minimum égale à 13 g/litre [29][79].

En pratique, les spécialistes de la culture de spirulines recommandent que le niveau d'eau des bassins soit de l'ordre de 20 cm ; en effet, cette hauteur donne une inertie thermique et une inertie de pH confortables.

Les produits chimiques jouant le rôle d'engrais pour assurer la croissance de la spiruline sont appelés les "intrants" : ils doivent contenir de l'**azote**, du **phosphore** et du **potassium** ; ces éléments classiques existent sous des formes variées. D'autre part, le **soufre**, le **magnésium**, le **calcium** et le **fer** doivent aussi être ajoutés dès lors qu'ils ne sont pas apportés en quantité suffisante par l'eau, le sel et les engrais [29].

Les sources d'azote préférées des spirulines sont l'ammoniac et l'urée, mais ces produits sont toxiques au-delà d'une concentration limite. L'azote est donc le plus souvent apporté par du nitrate, dont on peut mettre sans danger une forte dose, afin de constituer une réserve d'azote à long terme.

Le phosphore peut être apporté par du phosphate monoammonique (NH₄H₂PO₄), du phosphate trisodique (Na₃PO₄·12H₂O) ou du phosphate dipotassique (K₂HPO₄).

Le potassium, quant à lui, peut être apporté par le nitrate de potassium, le chlorure de potassium, le sulfate ou le phosphate dipotassique. La source de magnésium employée est généralement le sulfate de magnésium, appelé sel d'Epsom (MgSO₄·7H₂O).

Si l'on ne dispose pas de produits chimiques, certaines méthodes d'utilisation de produits naturels peuvent être employées. Elles sont explicitées dans le Manuel de Culture Artisanale de la spiruline, écrit par J.P. Jourdan [29]. Cet expert de la culture de spirulines déconseille par ailleurs l'emploi d'engrais agricoles ordinaires, car ils sont peu solubles et renferment de nombreuses impuretés.

Le milieu doit en outre contenir tous les oligo-éléments nécessaires à la croissance de la spiruline : zinc, acide borique, manganèse, cuivre, chrome, cobalt, molybdène... ; ceux-ci sont généralement présents dans l'eau utilisée ou apportés par les impuretés des sels.

A ce stade, il est important de remarquer que la consommation d'intrants se fait en deux temps et correspond à deux formulations différentes :

- la première consommation correspond à la préparation du milieu liquide dans lequel on introduit la souche de spiruline que l'on veut voir croître, à travers toutes les étapes de son développement, depuis les petits bassins successifs d'ensemencement, jusqu'au bassin définitif où la récolte sera possible (tableau XV) [79].
- la deuxième consommation est une consommation d'entretien (tableau XVIII) : chaque fois qu'on récolte de la spiruline, il faut remettre dans le bassin une quantité d'intrants en rapport avec ce qui vient de sortir du bassin sous forme de spiruline. Une formulation spécifique correspondant à cette consommation est détaillée un peu plus loin.

Nom de l'intrant	Formule chimique	g/L
Bicarbonate de sodium	NaHCO ₃	8
Chlorure de sodium	NaCl	5
Nitrate de potassium	KNO ₃	2
Sulfate de potassium	K ₂ SO ₄	1
Phosphate monoammonique	NH ₄ H ₂ PO ₄	0,2
Sulfate de magnésium	MgSO ₄ , 7 H ₂ O	0,2
Urée	NH ₂ -CO-NH ₂	0,02
Chaux	Ca(OH) ₂	0,02
Sulfate de fer	FeSO ₄ , 7 H ₂ O	0,005

Tableau XV : Exemple de composition chimique d'un milieu initial pour cultiver les spirulines ; ce milieu convient pour des eaux de dureté nulle ou faible [29].

Le milieu proposé par C. Zarrouk est un milieu standard très souvent cité comme référence. Il présente l'intérêt de s'adapter à presque toutes les souches de spiruline et de simplifier considérablement le travail de l'algoculteur. Toutefois, il comporte des minéraux chers (dont plusieurs sont en excès) et pas toujours faciles à se procurer.

Ce milieu "Zarrouk" est fabriqué à partir d'eau distillée et contient divers éléments répertoriés dans les tableaux XVI et XVII.

NaHCO ₃	16,8
K ₂ HPO ₄	0,5
NaNO ₃	2,5
K ₂ SO ₄	1
NaCl	1
MgSO ₄ , 7 H ₂ O	0,2
CaCl ₂	0,04
FeSO ₄ , 7 H ₂ O	0,01
EDTA*	0,08

*EDTA : il réagit avec le sulfate de fer pour donner un composé dans lequel l'atome de fer chélaté ne peut plus réagir aux réactifs courants.

Tableau XVI : Eléments contenus dans le milieu "Zarrouk", avec leur teneur exprimée en g/L [29].

Pour chaque litre de ce milieu de base sont ajoutés 1ml de solution A5 et 1ml de solution B6, dont les compositions sont données par le tableau XVII.

Solution A5	g/L
H ₃ BO ₃	2,86
MnCl ₂ , 4 H ₂ O	1,81
ZnSO ₄ , 7 H ₂ O	0,222
CuSO ₄ , 5 H ₂ O	0,079
MoO ₃	0,015
Solution B6	g/L
NH ₄ VO ₃	0,02296
K ₂ Cr ₂ (SO ₄) ₄ , 24 H ₂ O	0,096
NiSO ₄ , 7 H ₂ O	0,04785
Na ₂ WO ₄ , 2 H ₂ O	0,01794
Ti ₂ (SO ₄) ₃	0,04
Co(NO ₃) ₂ , 6 H ₂ O	0,04398

Tableau XVII : Composition des solutions A5 et B6 du milieu "Zarrouk" [29]

4) Ensemencement de la souche choisie

Les experts en culture de spiruline recommandent aux futurs exploitants de choisir une semence exclusivement spiralée, de grande taille, filtrant facilement et de couleur bleu-vert.

Ils leur conseillent de se procurer des souches pures (monoclonales) à l'Institut Pasteur ou chez ANTENNA Technologies, à Genève [29][76].

A titre d'exemple, un flacon contenant 150 g de culture de spiruline à une concentration de 1 g/L, permet au moins quatre cultures successives : la première dans un bocal de 2 L, la deuxième dans une bassine de 10 L, la troisième dans une de 50 L et la quatrième dans un petit bassin de 1 m², jusqu'à parvenir à un bassin de 1 000 L. A partir d'1 g de semence, un taux de croissance de 20 % par jour permet d'obtenir 20 m² d'un bassin de 15 cm de profondeur, la récolte étant possible dès le quarantième jour. Après l'ensemencement, les dilutions à effectuer dépendent essentiellement des conditions climatiques (température et ensoleillement) : un climat chaud et ensoleillé permet à la culture de se multiplier rapidement ; des dilutions de l'ordre de 25 à 30 % par jour sont possibles. Par contre, un climat plus tempéré et nuageux freinant la croissance, les dilutions dépassent rarement 15 à 20 % par jour.

La difficulté de cette étape est justement de réussir à augmenter la taille des bassins sans trop diluer la spiruline, le risque étant de tout perdre. Un instrument simple à utiliser évite ce genre de souci : le disque de Secchi (figure 10).

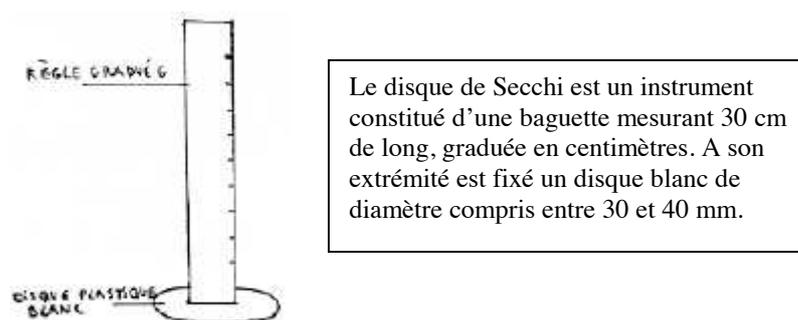


Figure 10 : Représentation d'un disque de Secchi.
© TECHNAP/CREDESA 2001 [81]

Cet instrument permet en effet d'évaluer la concentration en spiruline dans les bassins. Son mode d'emploi est le suivant :

il faut commencer par agiter le bassin pour l'homogénéiser avant de laisser ensuite décanter les boues pendant quelques minutes. Le disque est alors introduit dans l'eau et on relève à quelle graduation il devient impossible de le distinguer dans le milieu de culture. Par exemple, s'il a fallu atteindre 5 cm pour ne plus distinguer le disque, on dira que le disque de Secchi est à 5 unités.

Pour savoir comment faire évoluer la taille des bassins, il suffit d'attendre que le disque de Secchi dans un bassin plus petit soit de 2 unités. On dilue alors le tout dans un bassin plus grand pour avoir un disque de Secchi de 8 ou 9 unités. Il est important de ne pas dépasser cette valeur pour garder des dilutions aux normes, le risque étant encore une fois de perdre complètement la culture [81].

Une fois la taille de bassin voulue atteinte, on arrête les dilutions et la récolte peut commencer.

5) Alimentation de la spiruline

Une fois que la culture a démarré, il faut tenir compte des constituants qui disparaissent du milieu, après avoir été consommés par la spiruline. Les experts conseillent de ne pas rationner les éléments nutritifs pour la spiruline : selon eux, il est préférable d'avoir des ravitaillements fréquents et fractionnés plutôt qu'une nourriture importante mais tardive [79][82]. L'idéal est de reconstituer le milieu nutritif après chaque récolte de 1 kg de spiruline.

Deux sortes de nourriture doivent être prévues :

- o une nourriture obligatoire : il faut redonner au bassin les éléments perdus tels que l'azote, le phosphore, le potassium, le fer, le magnésium.

C'est la composition élémentaire de la spiruline qui permet de calculer ce qu'il faut remettre dans le bassin chaque fois qu'on en récolte 1 kilo de masse sèche. Le tableau XVIII indique quatre variantes possibles pour ce liquide d'entretien :

VARIANTES	1	2	3	4
par kg de spiruline récoltée	g	g	g	g
Urée	350	350	220	350
Phosphate trisodique	150	150		
Phosphate trisodique				170
Sulfate dipotassique	30		30	
Nitrate de sodium			385	
Nitrate de potasse		35		35
Sulfate de magnésium	30	30	30	30
Sulfate de fer (solution à 5 g de sulfate/ litre)	1 litre	1 litre	1 litre	1 litre
Chaux	10	10	10	10

Tableau XVIII : Exemples de formulations pour un liquide nourricier [82]

- o une nourriture non obligatoire : la nourriture carbonée.
Si on n'apporte pas cette nourriture carbonée, la spiruline se contentera du carbone apporté par le gaz carbonique de l'air et la productivité sera faible ($\approx 4\text{g/m}^2/\text{j}$). On a donc intérêt à amener un supplément de carbone pour produire plus. Il existe trois méthodes de supplémentation [29]:
 - l'emploi de bicarbonate : c'est ce qu'il y a de mieux quand on en trouve à un prix acceptable ;
 - l'emploi du gaz carbonique en bouteille : c'est un moyen qui fonctionne bien mais il est assez cher ; de plus, il nécessite de prendre de nombreuses précautions ;

- l'emploi de sucre blanc : c'est une méthode facile et bon marché. En contrepartie, des risques de pollution des bassins (boues ou milieu trouble) sont souvent signalés.

A travers deux processus conjoints, la fermentation la nuit et l'oxydation la journée, le sucre se transforme en CO₂ et en alcool. Les connaisseurs conseillent donc d'introduire 300 à 600 grammes de sucre par kg de spiruline récoltée.

6) Entretien des bassins et surveillance des cultures

Selon J.P Jourdan, le nettoyage des bassins doit se faire environ tous les 3 mois. La meilleure méthode consiste à transférer provisoirement la majeure partie du contenu du bassin dans un bassin voisin, puis de vidanger les boues, et brosser les bords et le fond, en rinçant. L'idéal pour maintenir un milieu clair est de brosser une fois par jour le fond et les côtés du bassin, agiter pendant la nuit, et garder un pH inférieur à 10,5. Si cela ne suffit pas, il faut épurer ou purger le milieu.

En effet, après deux à quatre mois de culture (selon le niveau de productivité) sans purge, il est fréquent que le milieu de culture, neuf et parfaitement clair au départ, devienne plus ou moins trouble ; la vitesse de filtration baisse et le pressage de la biomasse devient difficile. C'est pourquoi les spécialistes recommandent la pratique régulière de purges, voire même le remplacement total du milieu. L'inconvénient est que cela peut gêner l'environnement et coûter cher en produits. Ainsi, dans le cadre de cultures en région sèche, il est conseillé d'évaporer les purges par lagunage ; les sels minéraux récupérés peuvent ensuite réintégrer les milieux de culture de spiruline.

Au cours de la culture, plusieurs paramètres sont à contrôler régulièrement ; les cinq premiers cités doivent être contrôlés quotidiennement [83] :

- La **température du milieu** (température optimale : 35°C) ;
- Le **pH du milieu** (pH optimum compris entre 9,5 et 10,5) ;
- La **salinité du milieu** (13 g/L au minimum) ;
- Le **niveau d'eau des bassins** : il faut ajouter quotidiennement (de préférence le soir) de l'eau dans les bassins, de façon à maintenir le niveau de départ, c'est-à-dire environ 20 cm ; cette eau sert à compenser l'évaporation qui a eu lieu dans la journée. Pour éviter de mettre en péril la culture, la quantité d'eau ajoutée ne doit pas dépasser plus de 10 % du volume du bassin ;
- La **concentration en spiruline** (grâce au disque de Secchi) ;

- La **fréquence d'agitation** (minimum 4 fois par jour si agitation manuelle / agitation continue si système électrique sans risque de rompre les filaments / agitation pendant 15 minutes par heure si pompes immergées) ;
- Le **degré d'ensoleillement / ombrage** des bassins ;
- La **quantité d'exo polysaccharide sulfaté (EPS)** formée : il s'agit d'une espèce d'alginate secrétée par les spirulines, et qui forme comme une capsule au niveau de leur surface externe. L'EPS est ensuite peu à peu relâché dans le milieu de culture. Dans un premier temps, il se dissout dans ce milieu, le rendant plus épais ; ensuite, il se polymérise, s'insolubilise et finit par former des grumeaux jaune-bruns gélatineux parfois visibles à l'œil nu. Selon J.P Jourdan, le fait de ne pas récolter beaucoup, en laissant monter la concentration en spiruline, augmenterait le passage d'EPS dans le milieu. Un excès de formation est lié à un manque d'azote fixé et/ou à un pH trop bas ; on peut y remédier en ajoutant de l'urée et/ou du carbonate de soude [29].
Les masses gélatineuses de polysaccharides, lorsqu'elles sont nombreuses, piègent les filaments de spiruline, les entraînent au fond du bassin où ils meurent, faute de lumière et d'accès aux éléments nutritifs. En dehors de cette perte de rendement, la forte production d'EPS est aussi un problème dans le sens où elle salit le milieu de culture et conduit à des difficultés de récolte [84].
Par ailleurs, lors du colloque qui a eu lieu en 2004 sur l'île des Embiez, d'autres experts ont fait remarquer qu'un excès d'EPS semblait conduire à une impossibilité d'essorer la biomasse par pressage, alors qu'un défaut d'EPS semblait conduire à une biomasse très collante mais facilement essorable [30].
- L'**aspect des filaments de spiruline** : afin de s'assurer que le milieu de culture ne comporte que de la spiruline et pas d'autres espèces d'algue proches, il convient d'observer régulièrement les filaments au microscope.
Des "spirulines droites" apparaissent fréquemment dans les cultures, sans que personne ne sache encore pourquoi. Les scientifiques ont pu vérifier que ces "droites" apparues jusqu'à présent étaient bien des spirulines (*Arthrospira platensis*), de composition normale [85]. Ces vérifications ont été réalisées en utilisant des critères dimensionnels, morphologiques et nuances de couleur, et également grâce à une étude des "empreintes génétiques" par l'Université de Genève [86]. Néanmoins, elles ont des inconvénients, notamment une difficulté à se récolter. De plus, il convient d'être vigilant car elles ressemblent aux cyanobactéries *Oscillatoria*, dont il existe des variétés toxiques. Finalement, sur ce sujet des spirulines droites, les experts en culture de spiruline restent humbles et reconnaissent volontiers leur ignorance. La seule parade connue est une prophylaxie rigoureuse :

elle consiste à vider et stériliser le bassin infesté et à redémarrer avec une souche garantie sans droite comme celles provenant de l'Institut Pasteur ou de chez J. Falquet à Genève [29].

Par ailleurs, il faut savoir que tant que la spiruline est en croissance active, bien nourrie, récoltée, agitée, à pH > 9,5, d'une belle couleur vert foncé et que le milieu est régulièrement purgé, aucune espèce d'algue concurrente ne réussit habituellement à envahir le bassin. Cependant, l'apparition d'algues étrangères est toutefois possible, par exemple l'hiver en zone tempérée, sans que l'on s'en rende compte [87]. C'est pourquoi il est prudent de faire examiner (une ou deux fois par an), un échantillon de culture dans un laboratoire équipé d'un bon microscope. Bien entendu, il faut que le laborantin soit entraîné à reconnaître ce qui n'est pas de la spiruline.

D'après J.P Jourdan, le fait d'avoir une culture assez dense dès le début, évite le développement des chlorelles, diatomées et autres variétés d'algues : en effet, elles sont privées de lumière donc restent au fond.

Les algues intruses peuvent être de simples chlorelles (algues vertes monocellulaires comestibles), des *Oocystis* (grosses chlorelles) ou des cyanobactéries toxiques comme celles citées en début de première partie. Une planche située en annexe 3 permet de différencier les plus facilement.

L'observation au microscope permet aussi de constater si les filaments sont cassés (par agitation trop vive, trop de lumière ou manque de potassium), s'ils sont de petite taille (vitesse de croissance trop rapide, salinité ou pH trop élevés) ou à l'inverse, anormalement longs (manque de fer) [88].

➤ L'apparition d'**anomalies** :

- diminution de la teneur en phosphate du filtrat ;
- manque d'oxygène : si l'oxygène peut être considéré comme un poison pour la spiruline quand il est en forte sursaturation pendant la photosynthèse active, ce n'est pas le cas en l'absence de lumière puisque la spiruline a alors besoin d'oxygène pour respirer. Comme l'a montré J. Falquet, on atteint facilement l'anoxie en présence de 100 ppm de sucre, même en agitant la nuit [32].
- changement de couleur du milieu de culture ;
- apparition d'une odeur forte et désagréable ;
- formation d'amas ;
- contamination par des bactéries et/ou des métaux lourds ;

On comprend aisément la nécessité d'avoir, sur le site d'exploitation, un petit laboratoire de contrôle, afin de pouvoir surveiller régulièrement l'absence de contaminants (bactéries, autres micro-algues, protozoaires, larves d'insectes etc.).

Par ailleurs, la couleur du milieu de culture est une chose facile à vérifier car elle ne nécessite pas d'équipement particulier. Elle permet généralement de bien apprécier l'état de la culture [88] :

- une couleur pâlie signale souvent un manque d'azote fixé et/ou de CO₂ ; il faut alors vérifier le pH du milieu. Si l'examen au microscope montre que la couleur pâle est liée à des cellules "vides", alors la culture a probablement été stressée (par un brusque changement de pH ou une variation brutale de la pression osmotique dans les cellules) ;
- une culture jaune ou vert-olive indique qu'il y a eu destruction de la chlorophylle (photolyse), suite à un excès de lumière, d'un manque d'azote, d'une agitation trop faible ou d'un pH supérieur à 11,5 ;
- une culture jaunâtre sur un fond d'eau grisâtre ou laiteux signifie que la micro-algue souffre d'un déficit en carbone et éventuellement en azote. De plus, il a en général beaucoup de bactéries. Mais normalement, elles ne s'attaquent pas à la spiruline (surtout si l'agitation est rapide) et elles meurent dès qu'il n'y a plus de polysaccharides dans le milieu ;
- une absence de couleur indique que la spiruline a été soit piégée (dans des amas de polysaccharides, dans des cristaux de carbonate de calcium ou de phosphate), soit dévorée par des prédateurs : larves de moustique, larve d'*Ephydra* (mouche des marais salés), amibes. La seule chose à faire est alors de nettoyer totalement le bassin et de recommencer une culture.

Toutes les anomalies rencontrées lors des cultures de spiruline, ainsi que leurs remèdes sont bien décrits par J.P Jourdan dans son manuel [29] ; il est possible de s'y référer pour plus de précisions.

4.2.3 Récolte

La récolte doit être organisée de façon à maintenir un flux continu entre matières premières et produit fini ; ainsi, une récolte régulière (tous les deux jours) permet à la culture de garder un rythme de croissance exponentiel.

Il est important d'évaluer régulièrement la densité des bassins en spiruline, afin d'éviter les phénomènes de limitation de croissance. Ceux-ci apparaissent suite au manque de lumière, dans le cadre de cultures trop denses. C'est le disque de Secchi qui permet de savoir s'il est temps de récolter ou pas. Lorsque celui-ci est à inférieure à 3 unités, c'est le bon moment [89][90].

Une fois la culture prête pour la récolte, on doit pouvoir prélever au moins 25 % de la culture par jour.

D'autre part, l'expérience prouve qu'il est préférable de pratiquer la récolte le matin de bonne heure, car la teneur de la spiruline en protéines y est généralement plus élevée que le soir.

Deux autres raisons renforcent ce choix : une température plus faible et le bénéfice d'une pleine journée d'ensoleillement pour le séchage (quand celui-ci est solaire).

La récolte étant une opération un peu délicate, il est conseillé de suivre un protocole assez rigoureux, divisible en quatre étapes successives :

4.2.3.1. Filtration

La récolte consiste d'abord à filtrer une partie de la culture sur une toile très fine (maille de 30 à 60 μm) de manière à recueillir la spiruline sur la toile et à laisser passer le filtrat qui pourra être réutilisé dans le bassin de production.

Afin de récolter une spiruline aussi pure que possible, il est conseillé de disposer de trois tamis superposables :

- Le premier est un simple crible sur un cadre de bois qui permet de stopper les feuilles, les gros insectes ou encore les petits animaux qui tomberaient dans le bassin ;
- le second, constitué comme le premier, est recouvert en plus par une toile de nylon qui laisse passer la spiruline mais stoppe les boues et les larves d'insectes ;
- le troisième est, comme le second, sauf que la toile de nylon simple est remplacée par une toile de récolte à maille très fine (30 μm par exemple).

Des petits volumes sont prélevés manuellement du milieu de culture ou grâce à une pompe électrique, celle-ci permettant un travail plus rapide et plus productif.

La filtration s'opère en faisant couler le liquide à travers les différents tamis.

Après un temps variable selon l'importance de la récolte et la concentration de la spiruline dans le milieu (entre 30 minutes et une bonne heure), la pâte verte de spiruline qui s'est accumulée sur le filtre peut être récupérée.

La toile de filtration est enlevée du cadre et une boule de spiruline (bien mobile si la spiruline est de bonne qualité), se rassemble au fond de la poche constituée par la toile (figure 11). Cette biomasse contient entre 80 et 100 g de spiruline sèche/kg de spiruline égouttée, soit 8 à 10 % [29].

La consistance de la biomasse obtenue dépend de la santé de la culture : une culture neuve donne une biomasse facile à récolter, car s'agglomérant bien, alors qu'une culture plus ancienne ou en mauvais état donne une pâte très liquide car renfermant un pourcentage d'eau très élevé.



Figure 11 : Toile de filtration contenant la spiruline récoltée.
© TECHNAP/CREDESA 2001.

Bien entendu, la biomasse doit être récoltée rapidement, afin de ne pas la laisser traîner à l'air libre : il s'agit d'éviter les fermentations provoquées par la décomposition des protéines et également toute contamination provenant de l'extérieur.

4.2.3.2. Lavage et essorage

Lorsque la culture est sale, malodorante ou trop salée, J.P Jourdan conseille de laver la biomasse avec de l'eau douce potable avant le pressage et le séchage.

De son côté, J. Falquet pense que le lavage de la spiruline après la récolte et avant le pressage est à éviter : selon lui, un lavage à l'eau douce provoque un choc osmotique qui peut faire éclater les cellules (certaines souches de spiruline sont particulièrement sensibles 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 [91].

L'essorage est réalisé par pression. La biomasse égouttée est, si possible, transférée dans une autre toile fine, enveloppée elle-même dans un linge ordinaire. Le paquet ainsi constitué est ensuite placé dans une presse à vis (figure 12b) ou sous une lourde charge (figure 12a).

Le temps de pressage dépend essentiellement de la qualité de la biomasse : une biomasse ferme ne nécessite que 10 à 15 minutes de pressage alors qu'une pâte très liquide requiert plus de 20 minutes. Dès l'apparition du liquide vert passant à travers la toile de pressage, il est conseillé de stopper les opérations.

Dans tous les cas le pressage ne doit pas excéder 30 à 35 minutes, afin de réduire le risque de fermentation (surtout en milieu tropical) [29].

La biomasse ainsi pressée contient environ 20 % de matière sèche.



Figures 12 a (à gauche) et 12b : A gauche, c'est une presse type pressoir utilisée par J.P Jourdan. A droite, c'est une presse à vis, réalisée par les Ets AFAP (Pahou).
© TECHNAP/CREDESA 2001.

4.2.3.3 Séchage

Le séchage est le seul moyen sûr de conserver et de distribuer la spiruline sans chaîne de froid. Lorsque la spiruline pressée ne peut être séchée de suite, il faut la conserver dans un récipient fermé, au réfrigérateur bien froid et pas trop longtemps (sinon elle dégage une odeur désagréable lors de l'extrusion).

A la différence des productions industrielles, lors d'une production artisanale, les filaments entiers de spiruline sont soumis au séchage. Le temps de séchage est plus long, mais l'intérieur des cellules n'est pas soumis au contact direct des gaz chauds.

La spiruline "égouttée" contient environ 90 % d'eau. La spiruline essorée en contient encore près de 80 %. Or, la spiruline séchée ne doit pas contenir plus de 7 à 8 % d'eau.

Comme le séchage doit être suffisamment rapide pour que le produit sèche sans fermenter, la biomasse issue du pressage est préalablement répartie par extrusion en "spaghetti", sur un plateau formé d'un cadre garni d'une moustiquaire en nylon ou en inox (maille 1 mm)(figure 14). L'extrusion peut aussi se faire à l'aide d'un décorateur de gâteau, d'un pistolet à colle silicone professionnel modifié (type SIKA)(figure 13) ou avec un poussoir à saucisses [92].



Figure 13 : Extrusion de spiruline essorée à l'aide d'un pistolet SIKA.
© TECHNAP/CREDESA 2001



Figure 14 : Spaghetti de spiruline disposés sur un tamis avant d'être installés dans un four de séchage.
© TECHNAP/CREDESA 2001

A noter que lorsque la biomasse est trop fluide, l'extrusion est impossible ; la biomasse doit alors être étalée en couche mince sur un film de polyéthylène avant d'être séchée.

Une fois extrudée, la spiruline est séchée au soleil, ou mieux, dans un courant d'air à faible humidité relative et forte capacité d'absorption d'eau (séchoir solaire indirect, ou électrique, ou à gaz, ou déshumidificateur), jusqu'à ce qu'elle ne soit plus molle du tout. Elle se détache alors facilement du support plastique et se broie aisément.

Avec un bon ensoleillement et un air sec, le séchage solaire est la solution la plus rapide et la moins coûteuse pour des faibles productions. Ce mode de séchage nécessite cependant que la spiruline soit protégée par une moustiquaire et qu'elle ne soit pas exposée directement aux rayons du soleil : un soleil intense et direct provoque une destruction de la chlorophylle par les rayons UV, ainsi qu'une altération sensible de son goût et de ses qualités nutritives.

Dans un séchoir coquillage (figures 15a et 15b), comme celui proposé par le GERES (Groupe Energies Renouvelables, Environnement et Solidarités), c'est le couvercle noir placé au-dessus de la spiruline qui, par rayonnement, chauffe la spiruline placée sur le plateau inférieur ; la ventilation (tirage naturel par une cheminée axiale supérieure) accélère le processus [93].



Figures 15a (à gauche) et 15b : Séchoir coquillage fourni par le GERES. © TECHNAP/CREDESA

2001.

Toutefois, le climat chaud et humide de certaines régions d'Afrique (Bénin par exemple) ne permet pas un chauffage solaire. Il faut donc d'autres techniques de séchage : par exemple, le séchage dans une armoire métallique munie d'un déshumidificateur et d'un ventilateur recyclant l'air à travers plusieurs plateaux (figures 16a et 16b). Les paramètres conditionnant la teneur finale en eau du produit sont :

- ✓ la température de l'air
- ✓ l'humidité relative de l'air
- ✓ le débit de ventilation dans le séchoir
- ✓ la durée du séchage.

Le déshumidificateur doit être capable d'abaisser l'humidité relative de l'air à 30 %. Ce dispositif est une sorte de séchoir thermodynamique, permettant de s'affranchir totalement de l'humidité de l'air ambiant et des poussières. Le seul problème est qu'il faut refroidir l'armoire pour éviter de dépasser 45°C à l'intérieur. En climat chaud et humide cela peut obliger à recourir à un climatiseur, à moins de sécher de nuit. A titre indicatif, on obtient 40 à 50 g de spiruline sèche par heure avec une puissance de 350 Watt (hors climatiseur) [93].

Il est aussi possible d'utiliser un séchoir électrique pour fruits et légumes, tel l'appareil suisse de marque Stöckli, de puissance 450 Watt (ou 600 Watt), avec des plateaux de 33 cm de diamètre ; sa capacité moyenne de séchage est de 20 g par heure (compté en sec) [93].

Si l'on n'a pas d'électricité, on peut employer un séchoir chauffé au gaz (butane ou méthane de digesteur) [29].



Figures 16a et 16b : Cabines de séchage (au Bénin) chauffées au gaz, permettant l'installation de neuf plateaux recouverts de spiruline essorée.
© TECHNAP/GREDESA 2001

Le premier séchoir (figure 16a) comporte 9 claies de 0,57 m² (soit 5,1 m² au total) et peut charger 1,9 kg de spiruline essorée/m². Sa capacité permet de fournir 2,8 kg de spiruline sèche/jour.

Le deuxième séchoir (figure 16b) dispose de 9 claies de 0,40 m² (soit 3,7 m² au total). Sa capacité de séchage est sensiblement identique au premier. Ces deux séchoirs travaillent à une température de 65°C avec un ventilateur. Le chauffage est obtenu avec du gaz butane ; il faut compter 2,5 à 2,8 kg de butane pour l'obtention d'1kg de spiruline sèche [93].

La durée du séchage varie selon :

- l'épaisseur de biomasse fraîche disposée sur chaque plateau
- le nombre de plateaux superposés
- le taux d'humidité de la biomasse à sécher
- la température et l'humidité de l'air
- le débit d'air.

En pratique, le temps de séchage ne doit pas dépasser 6 à 8 heures.

La température maximale pour conserver toutes les qualités nutritives de la spiruline est fixée à 65°C. Le produit final doit être d'une jolie couleur verte, craquant, facile à détacher du support de séchage et facile à transformer en poudre. Celle-ci doit contenir moins de 9 % d'eau pour bien se conserver. En effet, les études menées par A. Belay [94], montrent que le taux d'humidité résiduel limite se situe vers 8 % ; au-delà de ce pourcentage, la croissance de moisissures et de bactéries devient possible. A noter que les spaghetti secs obtenus par séchage à basse température (40°C) ne sont pas creux alors que ceux séchés à 65°C comportent souvent un canal central vide [29]. Un broyage modéré (type moulin à café) les transforme en granulés réguliers.

4.2.3.4. Broyage

Une fois sèche, la spiruline peut être broyée à l'aide d'un moulin à café, de façon à obtenir une poudre plus ou moins fine selon le goût de chacun. J.P Jourdan signale que les broyeurs manuels de marque Sfinx ou Corona, très répandus dans beaucoup de pays d'Afrique et d'Amérique Latine, sont particulièrement efficaces et bien adaptés.

La densité apparente de la spiruline extrudée, séchée et broyée est de 0,66 kg/litre [29].

4.2.4 Conditionnement et conservation

Durant la mauvaise saison, une "souche" de spiruline doit impérativement être conservée dans son milieu de culture. Les contenants (bocaux, bonbonnes, bassines) devront laisser passer la lumière et être stockés dans un lieu clair mais à l'ombre, ou être sous éclairage électrique. Même si les cultures de spiruline survivent à des températures inférieures à 10°C, voire à de brèves gelées, il est prudent de ne pas les stocker en dessous de 18°C pendant de longues périodes, car les risques de contamination augmentent [95][96].

En ce qui concerne la biomasse non lavée et pressée jusqu'à une teneur en matière sèche comprise entre 20 et 30 %, la durée de conservation ne dépasse pas quelques heures à température ambiante. Réfrigérée à 4°C, cette biomasse peut-être conservée deux à trois jours ; cette durée peut atteindre une bonne semaine si on ajoute 5 à 10 % de sel. Le mélange de biomasse de spiruline avec une huile alimentaire ainsi que certains condiments (herbes aromatiques) permettent également de prolonger le temps de conservation [32].

La congélation de la biomasse de spiruline est possible mais elle doit s'effectuer aussi rapidement que possible (couches minces ou installations spéciales), sans quoi la taille des cristaux de glace produits risque d'endommager ses filaments. Dans ces conditions, lors de la décongélation, il se produirait une exsudation massive du contenu cellulaire ; le produit obtenu serait peu engageant car de texture semi-gélifiée et de couleur bleue très foncée.

Le séchage reste de loin le processus de conservation le plus utilisé pour la spiruline.

Les trois spécialistes J. Falquet, J.P Jourdan et C. Darcas estiment que les méthodes de séchage en couche mince par flux d'air à température modérées sont préférables pour garder les qualités nutritionnelles de la spiruline jusqu'au moment de la consommation.

La technique du "mix-drying" présentée par R. Fox lors du colloque sur la production de spiruline artisanale (Mialet, 2002) [58] semble prometteuse lorsqu'il s'agit de produire directement une préparation alimentaire contenant de la spiruline . Il s'agit d'une méthode de séchage basée sur l'association de spiruline à une céréale : la pâte de spiruline renfermant 80 % d'humidité est mixée avec une farine de sevrage préalablement déshydratée et précuite par chauffage à 80°C. La proportion est d'une partie de spiruline pour dix parties de farine. L'ensemble est ensuite mis en forme et séché. Cette technique, en permettant de baisser immédiatement le taux d'humidité de la spiruline, présente l'avantage de s'écarter au plus vite de la zone où l'activité de l'eau engendre encore les réactions enzymatiques et le développement de micro-organismes contaminants. Les essais réalisés jusqu'à maintenant sont encourageants, d'autant plus que le pain à la spiruline, obtenu par cette méthode, est jugé "délicieux".

Au final, sur le plan de la qualité nutritionnelle du produit sec, quatre paramètres sont à prendre en compte :

- ✓ le type de séchage (gardant les filaments intacts ou brisant les filaments) ;
- ✓ le taux d'humidité résiduel
- ✓ la protection contre la lumière
- ✓ la protection contre l'oxygène

Les deux premiers paramètres ayant été précédemment évoqués, reste à étudier les deux autres.

En cas de forte exposition à la lumière, la chlorophylle est assez vite détruite par des réactions photochimiques ; la couleur bleue de la phycocyanine apparaît alors comme dominante.

La sensibilité de la spiruline séchée vis-à-vis de l'oxygène a été étudiée par plusieurs scientifiques. En 1997, A. Belay a publié les résultats de ses essais concernant les effets de l'oxygène sur de la poudre de spiruline séchée [94] : après un stockage de cinq mois, à 25°C, dans de simples sachets en polyéthylène, 50 % du β -carotène de la spiruline était détruit ; parallèlement, la même spiruline conditionnée dans des sachets étanches à l'oxygène, avait conservé 98 % de son β -carotène.

D'autres chercheurs ont aussi montré qu'une spiruline, même délicatement séchée, pouvait devenir malodorante suite à une oxydation pendant son stockage.

L'action combinée de la lumière et de l'oxygène est donc des plus dommageables : par conséquent, seul un **conditionnement opaque et sous vide** (ou sous gaz inerte) peut garantir la conservation longue durée de la spiruline [32]. Les sachets aluminisés multicouches thermoscellables sont donc fortement recommandés (figure 17).



Figure 17 : Sachets aluminisés pour la conservation idéale de la spiruline séchée.
Photo J.P Jourdan, décembre 2006 [97].

Une spiruline de bonne qualité, emballée sous vide dans ces sachets, et conservée à une température inférieure à 30°C se conserve pendant cinq ans [97].

A noter que ce type de conditionnement n'est pas dangereux pour la santé puisque, grâce aux multicouches, l'aluminium n'est pas en contact direct avec le produit consommable.

Par ailleurs, la taille des sachets a aussi son importance. En effet, des sachets de 25, 35 ou 50 grammes permettent de garantir la qualité de la spiruline car ils sont consommés dans la semaine ; ce n'est pas le cas des gros sachets qui renferment de la spiruline pour plusieurs mois. Une fois ouverts, si aucune précaution spéciale n'est prise pour la conservation, la spiruline finit par perdre une partie de ses propriétés. De plus, les petits sachets ont un prix plus accessible aux personnes démunies, en comparaison de celui des sachets de 100 g ou plus.

Certes, l'emballage est un élément important du coût de la spiruline, mais il est important de ne pas le négliger. Pour les petites exploitations, il est possible de réduire le coût si les exploitants décident de se grouper autour d'une centrale d'achat.

Néanmoins, le prix de l'emballage paraît tout de même excessif, par rapport au prix des intrants par exemple. Il serait souhaitable que des études soient menées afin de trouver d'autres solutions de conditionnement ou de distribution de la spiruline.

4.2.5 Contrôle de la qualité bactériologique du produit fini (cf. 3.4.1)

Voici quelques remarques concernant les règles d'hygiène à appliquer dans le cadre de la production de spiruline destinée à la consommation alimentaire humaine.

Concernant les cultures artisanales et familiales, les mesures d'hygiène sont moins draconiennes que pour une production industrielle (cf. 4.3.1). Le personnel des exploitations, les locaux (laboratoire, aire de séchage, lieu de conditionnement) et les matériels utilisés doivent être aussi propres que possible. Ces matériels ainsi que les mains des employés doivent être soigneusement lavés et séchés. Le contact direct des mains avec le produit sec est prohibé (pour éviter une contamination par *Staphylococcus aureus*) et une attention toute particulière doit être apportée au produit dès lors que celui-ci est séché.

4.2.6 Etudes toxicologiques (cf. 3.4.1)

4.3 Culture industrielle

4.3.1 En quoi diffère-t-elle de la culture artisanale ?

Au-delà de la taille des exploitations, la distinction entre culture artisanale et industrielle réside davantage dans la relation différente à la technique. En effet, certaines installations construites dans les pays en voie de développement (PVD) dépassent parfois la taille de certaines exploitations industrielles, notamment françaises.

Ce sont les recherches concernant le développement du genre *Arthrospira* en milieu naturel et en milieux contrôlés, qui ont permis l'élaboration de protocoles visant à optimiser la culture des spirulines de l'échelle familiale à l'échelle industrielle.

La production industrielle est principalement commercialisée en tant que complément alimentaire "de confort" dans les pays de l'hémisphère Nord (pays riches). Une petite partie est réservée à d'autres utilisations étudiées dans la deuxième partie (aquaculture, alimentation des animaux, industrie cosmétique).

En premier lieu, **les installations industrielles de production de spiruline sont pensées par rapport à un ensemble de normes sanitaires**. Des conditions environnementales très saines sont donc recherchées : la qualité de l'eau, de l'air et de la nourriture joue un rôle important dans la qualité du produit final. En effet, les éléments contenus dans une eau impure, un air pollué ou une nourriture de mauvaise qualité contaminent un produit destiné à l'alimentation humaine. Les grosses installations industrielles sont généralement équipées d'un laboratoire interne leur permettant le contrôle des intrants ainsi que le suivi de la qualité de la production.

Ensuite, les **technologies utilisées** pour la culture industrielle sont issues de la recherche scientifique, dans le but de maximiser les rendements de production. La spiruline produite industriellement est aussi souvent enrichie en diverses molécules, grâce à des procédés qui sont ensuite brevetés (cf. deuxième partie).

De plus, la **surface unitaire** et la **surface totale des bassins** de culture sont nettement plus importantes dans le cadre des grosses exploitations industrielles, par rapport aux exploitations artisanales. Le plus souvent, il s'agit de bassins en plastique de type "raceway", systèmes de culture en masse utilisés depuis les années 1950 ; ils se présentent comme des bassins à ciel ouvert, peu profonds, circulaires ou formant des boucles étroitement imbriquées les unes contre les autres. Ils sont munis de deux branchements assurant l'arrivée du milieu de culture frais et le prélèvement de la récolte. En pratique, les bassins de culture industrielle ne sont pas beaucoup plus larges que les bassins artisanaux, mais ils sont très allongés.

Concernant l'**agitation** du milieu de culture, du fait de la forme des bassins industriels, le brassage s'effectue toujours mécaniquement, **grâce à de grandes roues à aubes**. Les bassins sont, par ailleurs, toujours munis d'une chicane médiane.

Le **séchage** industriel sur tambours chauffants, trop néfaste pour les filaments de spiruline, a progressivement laissé sa place à la **pulvérisation dans l'air chaud** (le "**spray-drying**" = atomisation), principale méthode actuellement utilisée dans le cadre de grosses productions. Le procédé consiste à liquéfier les cellules de spiruline en les cassant pour constituer un liquide qui pourra ensuite être pulvérisé dans une chambre conique contre un courant d'air à très haute température (entre 180 et 210°C). Cette technique présente pourtant un inconvénient majeur qui touche les qualités nutritionnelles du produit : la liquéfaction de la spiruline en poudre rompt la membrane cellulaire et expose le contenu du produit à une oxydation accélérée, laquelle dégrade certains composants actifs. De plus, la haute température contribue aussi à augmenter la dégradation de ces composants [32].

Les petits producteurs industriels ont, par conséquent, adopté le principe utilisé dans les fermes artisanales : le séchage en couche mince par flux d'air à température modérée ; c'est actuellement la meilleure technique de séchage au regard de la qualité nutritionnelle du produit final.

A noter que le séchage sur "lit jaillissant" a été récemment testé avec succès [98]. La technique consiste à pulvériser une biomasse très liquide (environ 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 leur surface ; la poudre tombe au fond de l'appareil et s'accumule.

Une autre différence existe sur le plan des **mesures d'hygiène entourant la culture** de spiruline. Comme pour chaque produit de l'industrie alimentaire destiné à la consommation humaine, les normes en matière d'hygiène sont draconiennes. Des conditions hygiéniques irréprochables sont requises à chaque étape de la culture et jusqu'au moment de la vente au consommateur. Afin de respecter ces règles, les producteurs industriels sont donc soumis à des contraintes particulières :

- port de gants, masques et résilles ;
- utilisation de matériel en plastique alimentaire, verre ou inox ;
- filtration de l'air ;
- stérilisation des outils, du produit et des emballages.

Pour terminer, le **vocabulaire employé** n'est pas le même : les producteurs industriels sont appelés "ingénieurs" ou "scientifiques" ; le concepteur de l'exploitation est un "technicien" ; la spiruline est produite dans une "ferme" ou un "laboratoire".

Dans le cadre artisanal, le personnel est composé d'"algoculteurs", d'"apprentis", de "paysans", de "personnes récoltantes" et de "chercheurs de terrain". Cette dernière appellation indique que les chercheurs travaillent directement sur le terrain ou dans des laboratoires de fortune, en tout cas bien loin du monde universitaire et de ses moyens techniques.

Cette différence de vocabulaire révèle bien l'existence d'un fossé entre les deux types de culture.

Les installations artisanales reposent davantage sur une relation sensorielle avec la culture : l'observation, les suivis oculaire, olfactif et tactile remplacent souvent les instruments et dispositifs issus de laboratoires. La qualité de la spiruline artisanale est essentiellement garantie par l'hygiène des manipulateurs et des matériaux. Le dispositif est volontairement souple pour être adaptable aux conditions locales.

On s'aperçoit vite que toutes les technologies nécessaires à la qualité de la production industrielle ont un coût, lequel est sans commune mesure avec les techniques simplistes utilisées dans les cultures artisanales. Mais cela est normal puisqu'il s'agit en pratique de **deux productions aux finalités très différentes** :

- la production artisanale est destinée aux populations locales pauvres et en état de dénutrition plus ou moins sévère. Elle n'est pas un luxe pour eux et ils doivent pouvoir l'acheter avec le peu de moyens dont ils disposent. C'est en partie pour cela que les techniques utilisées sont simples et accessibles, de façon à ne pas faire flamber les coûts de production et donc les prix de vente.

Par ailleurs, les populations qui la consomment ne prêtent pas tant d'attention à la qualité de la production que les populations aisées ; les règles d'hygiène ne sont pas du même niveau dans les pays pauvres et dans les pays riches. Certes, une spiruline artisanale peut être de très bonne qualité. Mais si elle est produite et surtout séchée et manipulée dans un environnement riche en microbes, elle ne pourra être consommée que par des personnes habituées à cet environnement ; elle ne pourrait être commercialisée en ville ou sur le marché international, qu'après des analyses permettant de vérifier qu'elle est conforme aux normes en vigueur dans les pays importateurs.

- la production industrielle est commercialisée dans les pays riches. Elle est vendue dans certaines pharmacies ou commerces de produits diététiques, à des prix très élevés. Evidemment, la spiruline dans ces pays ne correspond pas à un besoin vital : elle est surtout utilisée pour stimuler l'appétit, comme complément alimentaire en accompagnement des régimes amaigrissants ou pour renforcer la masse musculaire des sportifs de haut niveau (cf. deuxième partie 1.1.1.).

Pour avoir l'autorisation d'être mise sur le marché, la spiruline produite est soumise à de nombreux contrôles très poussés et forcément...coûteux. Les industries cherchent toujours à produire une spiruline offrant des qualités nutritionnelles optimales.

Par ailleurs, il existe une concurrence entre les différents producteurs industriels, laquelle n'existe pas au niveau des producteurs locaux des pays du tiers-monde.

4.3.2 Principales fermes industrielles implantées dans les pays industrialisés ou émergents

- **Sosa Texcoco, au Mexique**



Figure 18 : Sosa Texcoco près de la ville de Mexico.
SpirulinaSource.com © 1999-2004.

C'est au Mexique que la spiruline a été exploitée industriellement pour la première fois. L'usine de production (figure 18) est située à proximité du lac Texcoco dans lequel croît naturellement *Arthrospira maxima*. Initialement, il s'agissait d'une unité de production de carbonate de soude à partir de la saumure issue des sédiments du lac. Mais la spiruline du lac est venue perturber la cristallisation des carbonates. L'usine s'est alors tournée, au début des années 70, vers la production de spiruline à grande échelle, essentiellement destinée aux populations des pays du tiers-monde. En réalité, l'usine ne cultive pas la spiruline, elle se contente de la récolter et de la transformer avant de la vendre. Néanmoins, en comparant les productions cumulées de spiruline dans les différents pays du Monde depuis 1975, c'est cette exploitation qui compte la plus grande quantité produite [5].

A partir de 1979, une partie de la production est exportée vers les Etats-Unis, en vue d'une utilisation comme complément alimentaire.

Au cours de l'année 1992, alors que la production annuelle avoisinait les 500 tonnes, les autorités américaines ont décidé de bloquer les exportations. Le lac Texcoco étant situé près de Mexico, une des villes les plus polluées, la qualité de la spiruline a été jugée insatisfaisante. Des mesures ont alors été prises pour améliorer la qualité du produit, y compris la stérilisation à la chaleur pour détruire les bactéries dans le lac. Néanmoins, l'usine a dû se tourner vers une commercialisation destinée aux secteurs de l'alimentation animale et de l'aquaculture. Elle est maintenant fermée depuis plusieurs années.

Cependant, les techniques mises au point par Sosa Texcoco ont inspiré les plus grosses fermes de production de spiruline qui sont apparues après.

- **Earthrise Farms dans le désert de l'Imperial Valley, en Californie**

Earthrise est la ferme de spiruline la plus connue dans le monde, et sans doute aussi la plus respectée, en raison de son rôle de pionnier dans la culture de cette cyanobactérie, dès le début des années 80. C'est en 1976 que l'idée de ferme à spiruline est née aux Etats-Unis. Après plusieurs mois d'essais sur des bassins pilotes, la ferme est devenue officielle, sous le nom de Proteus Corporation. La production industrielle de spiruline a vraiment démarré dans le courant de l'année 1977. Mais, au mois d'août de cette même année, la ferme a été totalement détruite par le passage de l'ouragan Doreen et les importantes inondations (totalement inattendues pour la région) qui ont suivi [99][100].

Une nouvelle ferme (figure 19) a donc été construite en 1979, dans la même région, mais sur un terrain plus élevé. En 1982, un partenariat a été établi avec une société japonaise, Dainippon Ink Chemicals (DIC). Ce partenariat unique a engendré un véritable bond de la production de spiruline, et une couverture de marchés internationaux. C'est au moment où la ferme est devenue en grande partie la propriété de DIC (division du groupe bancaire Sumitomo) que son nom a été remplacé par celui d'Earthrise Farms [5].

La plus grande ferme mondiale de spiruline allie donc les innovations technologiques japonaises aux ressources californiennes et américaines.

Le directeur général du département nutrition de DIC est Hidenori Shimamatsu (japonais), le président d'Earthrise Farms est Yoshimichi Ota (japonais) et le président de l'opération marketing est Robert Henrikson (américain).

Earthrise Farms (figure 19) est située au sud de la Californie, dans le désert du Colorado (à l'est de l'Imperial Valley, dans le désert du Sonoran). Les précipitations annuelles extrêmement faibles et l'ensoleillement sont les conditions idéales pour la culture de spiruline : dans le désert californien, les pluies représentent en moyenne 42 litres / m² / an, ce qui rend inutile le recours à l'utilisation de serres. La Spiruline est cultivée dans des bassins peu profonds, alimentés par l'eau très minéralisée en provenance du fleuve Colorado. Les installations sont éloignées de toute source de pollution.

La ferme dispose de 40 bassins d'une surface égale à 5 000 m², ce qui correspond à une surface totale de production de 20 hectares. L'exploitation fait travailler 50 personnes sur le site [101].



Figure 19 : Vue aérienne de la ferme Earthrise. © 2004 Earthrise Nutritionals LLC.

Les mois d'avril à septembre sont particulièrement favorables car les températures, comprises entre 40 et 50 °C, permettent une multiplication rapide des filaments. La récolte est effectuée quotidiennement. Au moment où la durée de l'ensoleillement est la plus longue, la récolte peut occuper du personnel 24 heures sur 24 ; il faut en effet toujours rester en phase avec les taux de croissance explosifs de la spiruline.

A intervalles réguliers, les bassins sont agités à l'aide de grandes roues à aube (environ 15 m de longueur). Au moment de la récolte, la spiruline est séparée de l'eau du milieu de culture grâce à de fins tamis spéciaux. Un premier tamis filtre les débris des bassins et les tamis suivants permettent de ne retenir au final que de la spiruline. L'épaisse pâte verte recueillie par le dernier filtre renferme environ 80 % d'eau. Elle est immédiatement soumise au procédé de séchage par "spray-drying" (figure 20).

Une fois séchée, la poudre est ensuite soit immédiatement conditionnée sous atmosphère restreinte, soit pressée lentement et à froid pour obtenir des comprimés [100].

Entre le moment de la récolte et celui du conditionnement, la spiruline n'est jamais en contact avec les mains des employés, ce qui évite les risques de contamination. D'autre part, il ne s'écoule pas plus de 15 minutes entre ces deux étapes de la production, ce qui évite une déperdition des composés nutritionnels.

Le conditionnement se compose d'emballages hermétiques spécialement adaptés.



Figure 20 : Tour de séchage par atomisation (3 étages) à Earthrise Farms.
© 2000 Robert Henrikson, Ronore Enterprises, Inc [102]

Environ 450 tonnes de spiruline sont récoltées par an à Earthrise Farms, la production mondiale étant actuellement de l'ordre de 3 500 tonnes [101]. L'annexe 4 représente une estimation de l'évolution de la production mondiale de spirulines entre les années 1975 et 1999.

La spiruline produite à Earthrise Farms est soumise aux contrôles de qualité très stricts des autorités sanitaires des Etats-Unis et de celles l'état de Californie. Soixante polluants environnementaux différents sont d'abord recherchés dans chaque lot. Ensuite, chacun subit encore 18 contrôles de qualité différents. La commercialisation n'est autorisée que lorsque le service Qualité certifie conforme tous ces contrôles (certification GMP pour Good Manufacturing Practice).

Cette spiruline a reçu, de la part de la FDA (Food and Drug Administration), l'avis GRAS (Generally Recognized as Safe) : il s'agit d'une reconnaissance de la sécurité de la spiruline comme aliment, sur la base des documents techniques remis par Earthrise Nutritionals, LLC. Depuis l'an 2000, la production est certifiée ISO 9001 (Quality Management System) [103].

A noter qu'après chaque récolte l'eau est recyclée ; seule la partie perdue par évaporation est rajoutée.

En ce qui concerne la commercialisation de la spiruline produite sur le site, Earthrise Farms dispose d'un département commercial situé près de Los Angeles. Vingt-sept personnes y sont employées à la distribution en Amérique du Nord (USA et Canada) mais aussi dans le monde entier par le biais d'entreprises partenaires situées dans plus de 30 pays en Amérique du Sud, en Europe ou en Asie. Aux Etats-Unis, la vente se fait surtout en boutiques de produits naturels ou en magasins spécialisés. C'est depuis le début des années 90 que la spiruline Earthrise est commercialisée dans des pays européens, notamment en Allemagne, au Royaume Uni et en Italie. Elle est disponible en France depuis le 1er janvier 2000, où elle est commercialisée par la société Natésis basée à Mérignac, près de Bordeaux. (figure 21) [104].

La composition de la spiruline produite sur le site d'Earthrise Farms est présentée dans l'annexe 5.



Figure 21 : Flacon renfermant des comprimés de spiruline en provenance d'Earthrise Farms ; il est commercialisé en France par la société Natésis.

© Natésis.

▪ **Société INTER'CHINA, en République Populaire de Chine**

La spiruline produite par cette société n'est pas cultivée en bassins artificiels ; elle provient d'un lac naturellement alcalin : le Lac Chenghai, situé dans la Province de Yunnan (figure 22).

Considéré par les experts comme le paradis de la spiruline, ce lac est situé dans les montagnes du sud-ouest de la Chine, à 1500 mètres d'altitude. Ce lieu est totalement dépourvu de pollution. Le pH de l'eau est compris entre 8,6 et 9,3. Par ailleurs, le lac est riche en carbone et en nombreux minéraux.

Ce site dispose d'une moyenne annuelle d'ensoleillement de 2 700 heures et d'une température moyenne de 18,7°C [105].



Figure 22 : Lac Chenghai (Chine) naturellement alcalin où la spiruline croît spontanément.
© 2005 Inter'China.

Une station de pompage puise l'eau du lac avec la spiruline sauvage qui s'y trouve pour l'amener vers des bassins naturels situés au bord du lac (figures 23a et 23b) ; ces bassins naturels sont différents des bassins artificiels dans lesquels le pH de l'eau est relevé artificiellement. De plus, la spiruline est nourrie exclusivement par l'eau du lac, sans aucun ajout de produit quelconque comme c'est souvent le cas dans les bassins artificiels afin d'accélérer son développement industriel et commercial.

Ensuite cette eau subit toute une série de filtrages, contrôles et analyses afin de permettre, en bout de chaîne, l'extraction d'une spiruline naturelle exempte d'additif chimique (figures 24a et 24b) [106].



Figures 23a (à gauche) et 23b : A gauche, opération de pompage de l'eau du lac.
A droite, brassage de l'eau après pompage. © 2005 Inter'China.



Figures 24a (à gauche) et 24b : A gauche, opération de filtration. A droite, extraction pour analyse.
 © 2005 Inter'China.

Le système de séchage n'est pas précisé dans les documents recueillis sur cette société. Ceux-ci évoquent l'utilisation "d'équipements de séchage avancés" qui permettent à la spiruline essorée d'être immédiatement séchée dans un délai d'une seconde. Cela, de manière à préserver toutes les qualités nutritionnelles de la spiruline.

La spiruline produite par cette exploitation est la spiruline Green-A. Sa composition moyenne pour 100 g est précisée en annexe 6 [109].

La Société INTER'CHINA a été créée en juillet 1995 ; elle porte ce nom car ses produits sont distribués via *internet*. L'objectif poursuivi est de mettre à la portée du public des produits de qualité, à un prix accessible [108].

La Dirigeante de cette société est diplômée de l'Université des Sciences Médicales de Chine de Shenyang. Avant de fonder sa société, cette femme a exercé la médecine pendant neuf années. C'est sans doute en partie grâce à cela que son entreprise approvisionne les établissements hospitaliers de toute la Chine.

En effet, les concurrents ne manquent pas puisque le pays compte actuellement environ 80 unités de production industrielle de spiruline, lesquelles totalisent une capacité annuelle de plus de 500 tonnes. On peut par exemple citer l'exploitation située sur l'île de Hainan (Chine du sud) : Hainan DIC Microalgae Company (figure 25) a une capacité de production annuelle en spiruline de l'ordre de 300 tonnes ; à côté de cette grosse ferme, il y a aussi celles situées dans le Fujian (province du sud-est de la Chine), le Jiangsu (province de la Chine centrale), l'Hubei (province du centre-est), le Shandong (province de la Chine orientale) et celles installées le long de la vallée du Huang He (fleuve Jaune). A noter que la ferme située dans la province de Guangdong (Chine du sud) cultive la spiruline dans de l'eau de mer [107].



Figure 25 : Hainan DIC microalgae Co., Ltd . Spirulinasource.com © 1999-2004.

L'entreprise qui assure la production de cette spiruline est considérée comme la plus grande au monde, sur le plan des recherches scientifiques, et du développement à partir de spirulines naturelles.

Des contrôles très stricts du lac sont régulièrement effectués.

En outre, le contrôle de qualité de la spiruline est réalisé à chacune des étapes de la production. Au final, la poudre de spiruline Green-A est soumise à des contrôles poussés et rigoureux (70 analyses différentes). C'est un laboratoire allemand spécialisé, Chemisches Laboratorium Lübeck, qui effectue ces contrôles et certifie la qualité et la sécurité sanitaire de la spiruline produite.

Face à sa composition riche et équilibrée en micro-nutriments, cet institut a d'ailleurs désigné la spiruline Green-A comme un produit « de Classe-Top » [105].

En 1996, cette spiruline a été désignée "Special Natural Aliment" pour les athlètes chinois participant aux Jeux Olympiques à Atlanta. L'année suivante, elle a obtenu la certification "Five Protective Health Function" remise par le Ministère de la Santé (cinq actions pour la protection de la santé). En 2000, la spiruline Green-A a obtenu l'appellation "Produit Bio", grâce au Label Green Food décerné par les Etats-Unis (figure 26) [110].



Figure 26 : Logo représentant le Label obtenu par la spiruline Green-A, certifiant sa qualité alimentaire.
Copyright© 2005 Inter'China.

En France, la société Direct-Import Inter'China, installée dans le département de l'Hérault, commercialise la spiruline récoltée par la société Inter'China.

La Spiruline Green-A est également distribuée dans de nombreux magasins de produits diététiques répartis dans différentes régions de France. Elle est aussi présentée lors de manifestations telles que le Salon des Produits Naturels et Bio, le but étant alors de réaliser des ventes directes [108].

- **Siam Algae Company dans les environs de Bangkok, en Thaïlande**

La construction de cette exploitation a débuté en 1977. Le climat tropical de cette région de Thaïlande permet une culture de spiruline toute l'année. Cette culture se fait dans des bassins peu profonds (15 à 25 cm d'eau) de type "raceway", agités mécaniquement par des roues à aubes (figure 28). Le mode de culture est le même que celui pratiqué par Earthrise Farms. **La production est comprise entre 100 et 150 tonnes par an [111].** Cette ferme (figure 27) est la propriété de DIC. En fait, le groupe DIC est incontestablement le plus grand producteur mondial de spiruline puisqu'il est propriétaire des exploitations Earthrise Nutritionals, LLC aux Etats-Unis, Siam Algae Co., Ltd en Thaïlande et Hainan DIC microalgae Co., Ltd, en République Populaire de Chine [112].



Figure 27 : Vue aérienne de Siam Algae Co., Ltd (Thaïlande)
© 2000 Robert Henrikson, Ronore Enterprises, Inc.



Figure 28 : Bassins de spiruline de Siam Algae Company ;
au premier plan, on peut distinguer un système de roues à aubes.
© 2000 Robert Henrikson, Ronore Enterprises, Inc.

La spiruline cultivée par les filiales de DIC est *Arthrospira platensis* ; elle est produite dans le cadre de la même culture **biologique** contrôlée. Elle est certifiée pure à 100 % et ne contient ni colorants, ni conservateurs, ni pesticides, ni organisme génétiquement modifié. Le laboratoire qui contrôle la production est le Tokyo Metropolitan Industrial Technology Research Institute, lequel est agréé par l'Union européenne.

La spiruline produite sur ce site a reçu la certification GMP et elle est conforme au cahier des charges du HACCP (Hazard Analysis Critical Control Point) ; il s'agit d'un moyen de gestion de la sécurité sanitaire des aliments par de nombreux contrôles continus effectués tout au long de la production.

Depuis l'an 2001, elle est certifiée ISO 9001 [113].

▪ **Cyanotech Corporation, à Keahole Point sur l'île d'Hawaï**

La société Cyanotech, dirigée par le D^r Gerald Cysewski, est située sur la côte de Kona de l'île d'Hawaï, dans un parc réservé à l'aquaculture : le Natural Energy Laboratory of Hawaii. Ce site dispose d'un environnement totalement vierge, aucune exploitation agricole ou chimique n'étant à proximité [114].

Il y a 200 ans, le volcan Hualalai est entré en éruption à proximité de l'endroit où la ferme se trouve actuellement. Toute la côte a été recouverte de lave brûlante. Les bassins actuels ont été installés au milieu de ce champ de lave inutile pour l'agriculture.

Le climat est idéal : le soleil brille pendant toute l'année et une brise de mer assure un apport permanent d'air pur. Les environs étant constitués de blocs de lave, il n'y a pas de poussière qui se soulève et tombe dans les bassins. De plus, cet endroit bénéficie d'un soleil plus intense que sur les autres côtes des Etats-Unis. La pluviométrie y est par ailleurs très faible, ce qui n'affecte pas la teneur en nutriments des milieux de culture. La douceur du climat tout au long de l'année permet une culture, en continu sur l'année [114].

Depuis 1984, Cyanotech produit et commercialise des produits naturels obtenus à partir de diverses microalgues. Elle cultive notamment *Spirulina platensis pacifica* : grâce au climat particulier, à l'effet permanent du soleil et à la composition idéale de l'eau utilisée pour le milieu de culture, la spiruline s'est progressivement adaptée à son milieu ; *Spirulina platensis* a donc donné une nouvelle variante : *Spirulina platensis pacifica*. Celle-ci pousse plus rapidement, est plus grande et contient davantage de bêta-carotène. Il ne s'agit pas d'une modification génétique, mais d'une adaptation à l'environnement [115].

Sa culture se fait dans des bassins ouverts, installés à proximité de l'océan Pacifique (figures 29 et 30). Ces bassins reposent directement sur un fond de pierre ponce. Leur aménagement est comparable à celui d'un étang de jardin. Un film plastique spécial est posé sur les rebords de pierre ponce d'une hauteur de 30 cm. La profondeur de l'eau dans les bassins ne dépasse pas 20 cm. Le fond de lave absorbe beaucoup de chaleur solaire le jour et la dégage à nouveau la nuit ; cela permet au milieu de culture de conserver sa température la nuit.

L'exploitation totalise 69 bassins dont 40 sont réservés à la culture de la spiruline. Chacun de ces bassins (200 m de long et 16 m de large environ) offre une surface de 3 000 m², ce qui correspond à une surface totale de 12 hectares pour la production de spiruline [116].

Après environ 7 jours de culture, les filaments spiralés qui ont grandi et se sont multipliés suffisamment permettent la récolte. Les conditions météorologiques, citées précédemment, permettent de générer une production annuelle en spiruline de l'ordre de 350 tonnes [116].

L'activité de Cyanotech allie productivité et respect de l'environnement ; en effet, elle utilise des ressources naturelles et pratique le recyclage des matières premières et des éléments nutritifs. Le directeur admet que ce principe de vaste recyclage permet aussi de réduire significativement les coûts de production [115].



Figure 29 : Vue aérienne des bassins de culture de spiruline, appartenant à l'entreprise Cyanotech (Hawaii).
© Cyanotech Corporation 2006



Figure 30 : Vue aérienne de la ferme Cyanotech ; © Cyanotech Corporation 2006.
Au premier plan, les bassins de couleur rouge renferment des algues productrices d'astaxanthine. Au second plan, les bassins vert foncé sont ceux où la spiruline est cultivée. La masse sombre sur la droite de la photo correspond au champ de lave sur lequel sont disposés les bassins.

L'eau utilisée pour le milieu de culture est un mélange d'eau de l'océan pompée à 600 m de profondeur et d'eau de source provenant de la forêt tropicale située plus haut. Le volume total d'eau nécessaire pour fournir le milieu de culture de tous les bassins est de l'ordre de 140 000 litres. L'agitation modérée des milieux de culture est assurée continuellement par de grandes roues à aubes (figure 31) ; elles permettent une exposition idéale de tous les filaments de spiruline à l'intense soleil hawaïen [116].



Figure 31 : Roues à aubes assurant l'agitation du milieu de culture des bassins.
 © Cyanotech Corporation 2006.

La méthode de production de spiruline sur ce site se déroule en huit étapes successives (figure 32) [117] :

1) Pompage de l'eau de l'océan

L'eau profonde du Pacifique est pompée grâce à de grandes canalisations plongeant à 600 m de profondeur. Cette eau se distingue par sa pureté exceptionnelle et sa richesse en minéraux. En effet, selon les océanographes, elle n'a pas été en contact avec l'atmosphère depuis plus de 2 500 ans. De plus, elle renferme 94 minéraux et oligo-éléments différents ; notamment riche en calcium et magnésium, il suffit de la compléter avec une source de bicarbonate de soude pour qu'elle devienne un milieu de culture idéal pour la spiruline.

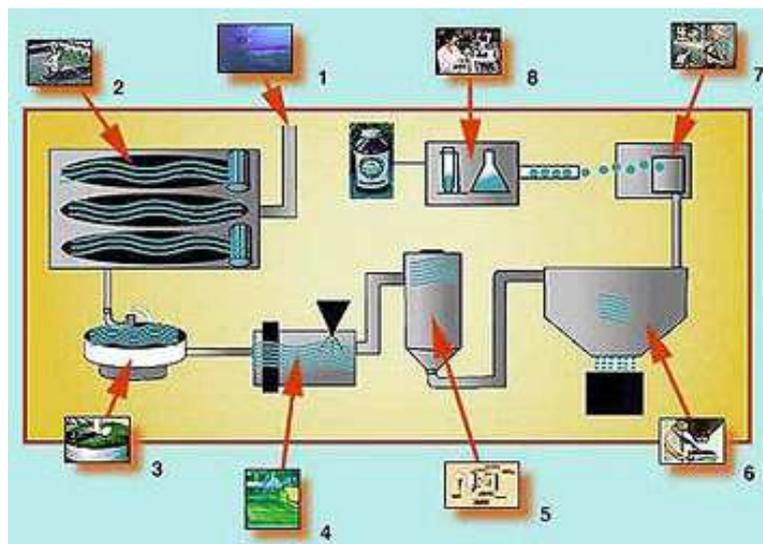


Figure 32 : Schéma représentant les huit étapes de la production de spiruline à Cyanotech Corporation. © Cyanotech Corporation 2006

2) Phase de croissance en bassins

Afin d'optimiser la croissance de la spiruline, l'eau du milieu est enrichie en dioxyde de carbone. A noter que ce CO₂ ajouté a la même qualité que celui qui est utilisé pour enrichir les eaux de boisson gazeuses.

Aucune matière organique n'est ajoutée au milieu de culture ; seuls des éléments minéraux de première qualité (notamment azote, potassium, fer et phosphore) sont employés de façon à augmenter la teneur des éléments apportés par l'eau de mer. Ce milieu de culture riche permet de maintenir un profil nutritionnel optimal de la spiruline.

3) Récolte de la biomasse sur des tamis vibrateurs

L'eau contenant les algues est pompée, filtrée et concentrée grâce à des tamis vibrants en acier inoxydable.

Dans un souci écologique, toute l'eau recueillie est ensuite transférée dans les bassins de culture afin qu'elle puisse participer au prochain cycle de croissance.

4) Rinçage à l'eau douce et préparation au séchage

La pâte de spiruline est ensuite rincée trois fois avec de l'eau de source pure. Cette étape est importante car elle permet l'obtention d'une spiruline présentant un goût ni salé ni piquant (contrairement à la plupart des spirulines produites industriellement).

Une fois rincée, on fait passer le concentré de spiruline dans un système de filtration par le vide, afin de la préparer à la phase de séchage.

Entre l'étape de récolte et la fin du séchage, il ne se passe qu'un quart d'heure.

5) Séchage

Le procédé utilisé est unique et breveté : l'"Ocean Chill Drying™" (figure 33) autrement dit, séchage par le froid océanique. Il s'agit d'une innovation technique permettant de contourner les effets négatifs de l'atomisation par la chaleur sur la qualité du produit final.

H. Desmorieux, chercheuse française ayant étudié l'impact des techniques de séchage sur la spiruline, a démontré que l'atomisation par la chaleur a un impact non négligeable sur la qualité du produit final [118].

Des tests menés par Cyanotech montrent clairement que la spiruline ne perd que 5 à 10 % de caroténoïdes avec son système de séchage contre 50 à 60 % avec la technique habituelle du spray-drying [116].

Ici, la pâte de spiruline fraîche est donc séchée à basse température ; le processus ne dure que cinq secondes. Le séchage s'effectue dans une chambre d'atomisation renfermant moins de 1 % d'oxygène.

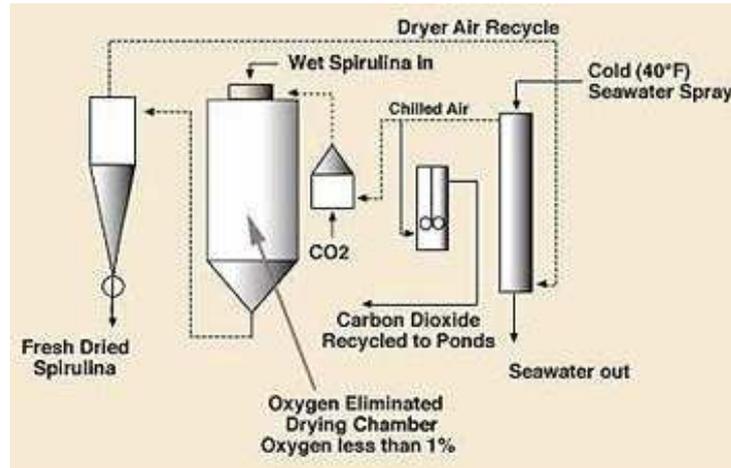


Figure 33 : Schéma représentant la technique de séchage utilisée par Cyanotech : l'«Ocean Chill Drying». © Cyanotech Corporation 2006.

Pour commencer, l'eau froide de l'océan (40°F, ce qui correspond à 5°C) est pulvérisée à un débit de 50 L/min, dans le gaz humide représenté par le CO₂. L'eau contenue dans le CO₂ est condensée par l'air froid. Le CO₂ ainsi asséché, est entraîné dans le séchoir à atomisation, lequel reçoit le liquide de spiruline. Dès lors que le gaz de séchage rencontre le liquide atomisé, une évaporation quasi-instantanée des composants volatils se produit, et les composants solides se transforment en une poudre fine et compacte. Cette poudre de spiruline est extraite de la chambre de séchage en même temps que le gaz, et séparée de celui-ci par un système cyclone : la poudre est récupérée à la base du cyclone, alors que le CO₂ s'échappe à sa partie supérieure. Ce CO₂ est ensuite récupéré et recyclé pour être utilisé comme élément de croissance, dans les milieux de culture [116].

L'utilisation d'un air de séchage pratiquement exempt d'oxygène permet de conserver intactes les substances nutritives de la spiruline qui sont sensibles à l'oxydation.

6) Conditionnement de la poudre de spiruline

La poudre de spiruline sèche recueillie est ensuite immédiatement conditionnée dans un emballage la mettant à l'abri de l'oxydation et de la lumière. Cet emballage est le verre VioSol® (figures 34 et 35), spécifiquement développé pour cette application. Voici le principe de son fonctionnement [119] : ce verre offre une protection totale contre la lumière visible mais il laisse passer la lumière violette et les infrarouges, particulièrement riches en énergie. Grâce à cette particularité, les constituants fragiles de la spiruline bénéficient d'une protection optimale. De plus, les oxydes métalliques dans le verre permettent également d'absorber l'énergie de la lumière provenant de l'extérieur (comme un type de capteur solaire) et de la diffuser ensuite très lentement à l'intérieur.

Celui-ci est capable de stimuler et renforcer la structure moléculaire d'une substance, retarder le processus de dégradation et maintenir la subtile bioénergie au niveau d'origine pendant un laps de temps prolongé.

Tout ceci explique l'effet protecteur de ce verre spécial. Il n'existe actuellement aucun autre verre offrant cette combinaison unique de protection totale contre le spectre visible et la perméabilité simultanée dans les spectres UV, violet et infrarouge.

Ce conditionnement permet d'assurer aux consommateurs l'achat d'une spiruline aussi fraîche que le jour où elle a été récoltée. De plus, le verre est recyclable.

7) Compression à froid pour l'obtention de comprimés

La poudre de spiruline générée par le procédé de séchage étant très fine, la fabrication de comprimés n'est pas aisée. L'entreprise résolu le problème en utilisant la technique de compression à froid. Néanmoins, comme on peut le constater avec l'annexe 7, contrairement à certains comprimés de spiruline mis sur le marché, ceux élaborés par Cyanotech ne renferment pas 100 % de poudre de spiruline ; des additifs sont ajoutés et ils représentent 1,5 % du poids [120].

8) Analyses de la qualité du produit final

D'une part, des échantillons d'eau sont prélevés chaque jour et soumis à des contrôles très stricts. D'autre part, 15 tests différents sont effectués sur chaque lot de spiruline, afin d'en déterminer les qualité et sécurité alimentaires. A noter que l'exploitation dispose d'un laboratoire interne lui permettant de réaliser tous ces contrôles.



Figure 39 : Flacon en verre renfermant des comprimés de spiruline élaborés par Cyanotech et commercialisés par la société Nutrex.
© 2003 Nutrex Hawaii Inc.

Figure 40 : Flacon en verre VioSol® contenant des comprimés de spiruline élaborés par Cyanotech et commercialisés par la société Marcus Rohrer. A droite, ce sont des comprimés de spiruline avant leur conditionnement. © Marcus Rohrer 2006.

Voici quelques précisions permettant de mieux comprendre comment Cyanotech a pu se différencier de toutes les autres cultures industrielles de spiruline [5]. Du fait que le fond de l'océan descend à pic à Keahole Point, le gouvernement américain a construit et testé, il y a plusieurs décennies, un dispositif produisant de l'énergie à partir du gradient thermique de l'océan à cet endroit. Il s'agit d'une forme d'énergie renouvelable appelée OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion). En pratique, il s'agit d'utiliser la différence de température existant entre les eaux de surface et les eaux très profondes pour produire de l'électricité.

Cyanotech a utilisé le système de canalisations existant pour pomper l'eau profonde de l'océan. Cette eau entre dans la composition des milieux de culture. Mais Cyanotech se sert aussi du phénomène physique lors des étapes de séchage : le CO₂ qui doit servir de gaz séchant dans le séchoir à atomisation, est d'abord asséché par condensation sur une partie froide de l'échangeur de chaleur refroidi par l'eau de l'océan [5].

- **Biorigin, dans la région de Quito, en Equateur**

Le site de culture se situe à 2 500 mètres d'altitude, dans la cordillère des Andes, sur la ligne de l'Equateur. Cette situation géographique particulière offre un air pur, une eau limpide et un microclimat, répondant parfaitement aux besoins de croissance de la spiruline. L'air y est sec et la durée d'ensoleillement est de 12 heures. L'altitude offrant un ensoleillement maximal, la photosynthèse est optimale tout au long de l'année [121].

De façon à maîtriser totalement la contamination par des facteurs extérieurs, la culture se fait en milieu fermé. Cela offre la garantie d'une absence de pollution organique et atmosphérique.

D'autre part, tous les besoins en eau du site sont assurés par une source d'eau pure en provenance des glaciers volcaniques andins. En outre, la culture de cette spiruline bénéficie de phosphates naturels et de sels minéraux naturels appelés nitrates du Chili. Les nitrates du Chili proviennent de gisements naturels réputés ; ils contiennent 15 % d'azote, 18,4 % de sodium, 11,6 % de potassium, 1 % de soufre (sous forme de sulfates), 0,12 % de calcium, 0,14 % de magnésium et de nombreux autres oligo-éléments, c'est-à-dire tous les éléments nutritifs nécessaires à une croissance optimale de la spiruline [121].

La technique de culture utilisée par Biorigin est unique : la biomasse est en permanence en mouvement dans une mince lame d'eau sur une légère pente. Selon les responsables de Biorigin, cette dynamique permanente favorise un développement homogène de la spiruline.

Après récolte, la spiruline est égouttée puis séchée.

Au moment de l'égouttage, la pâte est passée dans des filières pour obtenir des filaments, ce qui permet ensuite d'enchaîner directement l'étape du séchage.

Celui-ci est réalisé par un procédé exclusif développé en Suisse : le séchage par lit fluidisé, à faible température.

N'étant pas atomisée ni séchée à haute température, la spiruline conserve alors son intégrité cellulaire et, par conséquent, ses principes actifs sont protégés de l'oxydation. A en croire les essais menés par les scientifiques qui travaillent pour le compte de Biorigin, cette technique a également l'avantage de produire naturellement des micro-granules, lesquels offrent une biodisponibilité optimale de leurs micro-nutriments par rapport à celle des spirulines séchées par les autres méthodes de séchage industriel [122]. En effet, le temps de dissolution dans l'organisme de la spiruline ne doit être ni trop rapide (pour que le produit franchisse l'estomac et libère ses principes actifs dans l'intestin, où ils pourront être résorbés), ni trop lent (dans ce cas, les nutriments et micro-nutriments sont absorbés en moins grande quantité par l'organisme). Or, il se trouve justement que le temps de dissolution de la spiruline Biorigin est idéal alors que celui des spirulines séchées par les procédés standards (spray drying notamment) est trop long. Par ailleurs, dans un souci constant de qualité, la spiruline Biorigin est produite conformément au référentiel *Ecocert* : cela signifie qu'elle bénéficie de l'attestation de conformité attribuée aux productions écologiques de plantes aquatiques qui vérifient les conditions du cahier des charges (méthode HACCP). Une équipe de biochimistes est présente en permanence sur le site [122].

Les figures 41 à 46 représentent un éventail des produits commercialisés par la société Biorigin [123] :

✓ Spiruline BIORIGIN

Ce sont des comprimés ou granulés contenant 100 % de spiruline. Les conditionnements proposés sont les suivants : 180 comprimés (soit 90 g de poudre de spiruline) - 320 comprimés (160 g) (figure 36b) - 1000 comprimés (500 g) - granulés en pot de 150 g (figure 36a)[124] ;



Figures 36a (à gauche) et 36b : Pots de granulés et de comprimés Biorigin. © phytalis

✓ **AZINA - Zinc végétal** (figure 37)

Ce produit contient de la spiruline BIORIGIN fortement enrichie en zinc durant sa croissance. Ce procédé rend le zinc beaucoup plus facilement assimilable par l'organisme. Chaque comprimé renferme 99,8 % de spiruline et 0,2 % de dioxyde de silicium.

Quatre comprimés apportent 13,3 mg de zinc biodisponible, ce qui correspond à 89 % des apports journaliers recommandés.

Les comprimés sont conditionnés par pots de 120 (soit 60 g de poudre de spiruline) [124].



Figure 37 : Pot de 120 comprimés Azina. © phytalis

✓ **FERRINA - Fer végétal** (figure 38)

Il s'agit d'une spécialité renfermant de la spiruline BIORIGIN fortement enrichie en fer. Chaque comprimé renferme 99,8 % de spiruline et 0,2 % de dioxyde de silicium. Quatre comprimés apportent 11,4 mg de fer biodisponible, ce qui correspond à 71 % des apports journaliers recommandés.

Les comprimés sont conditionnés par pots de 120 (soit 90 g de poudre de spiruline) [124].



Figure 38 : Pot de 120 comprimés Ferrina.© phytalis

A noter qu'une entreprise suisse commercialise aussi la spiruline produite sur le site équatorien, dans de nombreux pays d'Europe. Elle la vend sous la dénomination "Flamant vert". En France, c'est à Bourges que se trouve le siège social de la filiale commercialisant la spiruline "Flamant vert".

Voici la gamme des produits qu'elle propose ; certains sont représentés par la figure 39 [125] :

- ✓ Comprimés de spiruline dosés à 500 mg (figure 39 b) ou gélules dosées à 400 mg (figure 39 a) ;
- ✓ Micro-granules en boîtes de 120 ou 500 g ;
- ✓ Tagliatelles BIO (figure 39 e) : elle renferment 4 % de spiruline et de la semoule de blé issu de l'agriculture biologique ;
- ✓ Barres vitalité au chocolat et à la spiruline (3 %) (figure 39 d) ;
- ✓ Comprimés ou gélules Spiruseng : complexe de spiruline (90 %) et ginseng (10%). Ce complément alimentaire associe les qualités reminéralisantes de la spiruline aux propriétés énergisantes de la racine de ginseng ;
- ✓ Comprimés ou gélules Spiru.C (figure 39c) : complexe de spiruline (80 %) et acérola (20 %). L'acérola est aussi connue sous le nom de cerise des antilles. Elle pousse dans les pays chauds sur de petits arbres. Ce fruit unique possède une richesse en Vitamine C naturelle environ 25 fois plus importante que l'orange.

Cette spécialité permet donc un apport intéressant en vitamine C puisque la spiruline seule n'en fournit pas beaucoup. Trois grammes de Spiru C, soit six comprimés, apportent 0,6 g d'acérola soit 90 mg de vitamine C naturelle. A noter que l'apport journalier recommandé en vitamine C est de 180 mg.



Figure 39 (a,b,c,d,e en partant du haut à gauche jusqu'en bas à droite) : Représentation de différents produits commercialisés contenant de la spiruline de marque "Flamant vert". © 2008 Flamant Vert.

- **Alpha Biotech, en France**

Alpha Biotech est une société bretonne spécialisée dans la production et la commercialisation de micro-algues et phytoplanctons. Le mode de production est écologique puisqu'elle n'utilise aucun produit phytosanitaire, mais des engrais homologués par l'agriculture biologique. L'eau chaude est fournie par chauffe eau solaire. Installée au cœur des marais salants de Guérande, la société filtre et stérilise l'eau de mer avant de l'utiliser. La première unité commerciale de production de spiruline y a débuté en 1997 (figure 40). Une autre unité de production existe dans le Roussillon depuis 2003 [126].



Figure 40 : Société Alpha Biotech vue du ciel (Le Frostidié 44410 Assérac).
© Alpha Biotech 2006.

Les deux sites sont situés dans un environnement privilégié. La culture en eau de mer permet l'apport naturel à la spiruline, de minéraux et d'oligo-éléments. En raison du climat de la France, lequel n'est pas idéal toute l'année pour la culture de spirulines, les bassins sont installés sous serre. Ils sont agités en continu par des roues à aubes et contrôlés chaque jour au microscope (figures 41a et 41b).



Figures 41a (à gauche) et 41b : Bassins "raceway" installés sous serre appartenant à la société Alpha Biotech. La photo de droite montre le même bassin vu sous un autre angle. On distingue nettement le séparateur médian et le système de roues à aubes. © Alphabiotech 2006

Le procédé de culture à l'eau de mer permet d'apporter naturellement du calcium, magnésium, fer, zinc, potassium, cuivre, manganèse...à la spiruline. Ces éléments, contenus dans la cyanobactérie, ont la particularité de présenter une grande biodisponibilité au niveau de l'organisme qui la consomme.

Le séchage de la spiruline récoltée est réalisé par de l'air à température ambiante (maximum 30°C), ce qui permet de garantir une excellente qualité biochimique du produit final.

Des analyses sont pratiquées régulièrement de façon à contrôler l'absence de métaux lourds dans les produits. Ces analyses sont effectuées par le CEVA (Centre d'Etude et de Valorisation des Algues situé dans les Côtes d'Armor) [127].

D'autre part, une analyse bactériologique par Petrifilm est effectuée sur chaque lot en interne. Ensuite, des échantillons de chaque lot de production sont analysés par un laboratoire indépendant (Clabo Conseil, à Merville dans le département du Nord).

Alpha Biotech commercialise deux types de produits à base de spiruline [128][129][130] :

- de la spiruline séchée, sous forme de poudre (le Spilyomer, figure 42a) ou sous forme de comprimés (Spiruline Koilon, figure 42c) ;
- un extrait liquide de spiruline fraîche (le Spirulysat, figure 42b).



Figure 42a (à gauche) : Flacon contenant de la spiruline séchée en poudre, commercialisée par Alpha Biotech. © Alpha Biotech 2006

Figure 42b (au centre) : Tubes renfermant un extrait liquide de spiruline commercialisé également par Alpha Biotech. © Alpha Biotech 2006

Figure 42c (à droite) : Flacon contenant des comprimés de spiruline cultivée sous serre près de Perpignan. © Kailon 2006

La **poudre lyophilisée**, conditionnée dans un récipient disposant d'un bouchon verseur, est bien adaptée pour une consommation quotidienne. A noter que la culture en eau de mer, sans rinçage, lui confère un goût salé original qui se différencie de celui des autres spirulines en poudre sur le marché [128]. On peut la saupoudrer sur les salades, le riz, les poissons....

D'après la notice, la composition pour 100 g est la suivante : protéines 50 g — glucides 13 g dont des polysaccharides sulfatés — lipides 11 g dont 4 g d'acides gras essentiels et 2 g de sulfolipides — minéraux : fer 16 g / magnésium 1,2 g / zinc 0,7 g / calcium 0,07 g — humidité 5 g — fibres 2 g — chlorophylles 2 g — caroténoïdes : 0,77 g dont 0,4 g de provitamine A — vitamines : 0,2 % : E,PP,B1,B2,B3,B12,K,C. Tous les acides aminés essentiels sont présents.

Le **Spirulysat®** est le premier extrait liquide de spiruline disponible sur le marché (figure 52). Il renferme 110 mg de phytonutriments et 8 mg de phytopigments par monodose. C'est en fait un ensemble d'innovations technologiques qui permet actuellement de restituer le meilleur de la spiruline fraîche [129]. La société Alpha Biotech assure utiliser des procédés exclusifs d'extraction sans élévation de température, permettant de garantir l'intégrité de toutes les molécules hydrosolubles thermosensibles contenues dans la spiruline.

Les extraits liquides ont donc logiquement une qualité optimale. De plus, des essais ont montré qu'ils étaient encore mieux assimilés que la forme sèche.

A noter qu'en fonction de son exposition à la lumière, cet extrait bleu présente des reflets rouges liés à la fluorescence de la phycocyanine qu'il contient.

D'après la notice, il est conseillé d'utiliser cette forme galénique en cures de fond de 30 jours, à raison de 2 ampoules par jour, après une maladie, un état de fatigue ou de stress intenses, de façon à se rétablir plus rapidement.

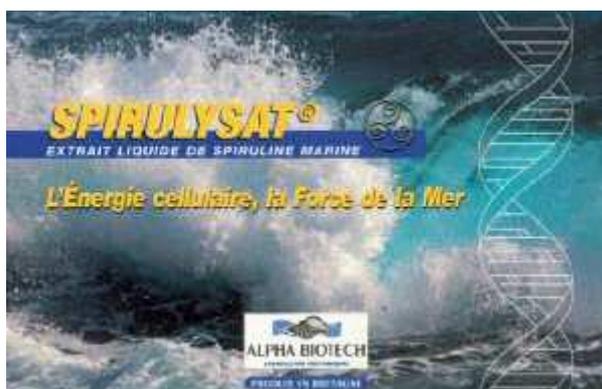


Figure 52 : Publicité Alpha Biotech sur son produit phare : le spirulysat®
© Alphabiotech 2007

La **Spiruline Koilon** est également produite par la société Alpha Biotech, avec les mêmes procédés, mais dans la ferme implantée dans le Roussillon [130]. D'après la notice qui l'accompagne, sa composition moyenne (en % de poids sec) est la suivante : protéines : 54,5 % présence de tous les acides

calcium 0,1 % ; magnésium 0,2 % ; zinc 0,005 % — fibres : moins de 1 %
— humidité : 5 % — chlorophylles : 2 % — caroténoïdes : 0,8 % dont
0,4 % de provitamine A — vitamines : 0,1 % : E, PP, B1, B2, B3, B12, K,
C . La "posologie" indiquée est de 10 à 20 comprimés par jour en cure de 3
semaines.

4.3.3 Trois exemples de culture artisanale en France

▪ **Spiruline Filao, produite dans le département du Var**

Le sud de la France présente un climat idéal (méditerranéen) pour le développement de la spiruline. Dix agriculteurs expérimentés ont donc décidé de se lancer dans sa production, et de s'associer pour proposer une spiruline de qualité appelée "spiruline Filao" [131].

Ces producteurs ont créé une charte à laquelle ils doivent tous adhérer : c'est la charte PASS (Producteurs Associés de Spiruline du Sud).

Ils se sont donc engagés à respecter des critères de production identiques, ainsi qu'un contrôle de la qualité à tous les stades de fabrication.

Les dix adhérents à cette charte sont installés dans une zone géographique allant de Toulon à Aubagne (frontière du département des Bouches du Rhône).

Cette spiruline n'est produite qu'en saison chaude, c'est-à-dire de mai à octobre. Elle est cultivée dans des bassins abrités sous un tunnel plastique.

Pour l'anecdote, la spiruline Filao a été présentée pour la première fois au Salon International de l'Agriculture de Paris, en mars 2007.

Voici quelques précisions concernant leur méthode de culture :

les producteurs de spiruline Filao ont choisi de ne pas laver la spiruline pour faire diminuer le pH, contrairement à ce qui est souvent pratiqué au niveau des grosses exploitations. Leur choix paraît tout à fait pertinent.

En effet, l'eau de rinçage ayant un pH nettement inférieur à celui de la spiruline produite (pH # 10), il y a un risque évident de choc osmotique : la paroi cellulaire de chaque cellule de spiruline peut exploser et laisser sortir l'ensemble des micro-nutriments. Dès lors, les vitamines, enzymes et autres constituants risquent d'être soumis à l'oxydation, ce qui nuirait à la qualité finale de la spiruline. Afin d'abaisser la valeur du pH, ces algoculteurs préfèrent presser la pâte de spiruline (à l'aide d'une presse mécanique) de façon à éliminer l'excès d'eau alcaline [131]. Cette méthode permet effectivement de préserver l'intégrité des micro-nutriments.

Après cette étape d'essorage, la spiruline est façonnée en spaghetti, de sorte à faciliter son séchage.

C'est la méthode de séchage à très basse température qui est utilisée, contrairement à celle pratiquée pour la plupart des spirulines industrielles (technique du "spray drying"). D'une part, parce qu'elle assure une meilleure préservation des vitamines et phytonutriments, et d'autre part, parce qu'elle forme naturellement des micro-granules. Or, comme cela a été précédemment écrit, ces micro-granules sont plus faciles à utiliser que la poudre et ils se conservent encore mieux.

Après conditionnement, la production est distribuée localement, directement chez des particuliers ou en magasins spécialisés. La qualité de cette Spiruline Filao est contrôlée par un laboratoire accrédité COFRAC (COmité FRançais d'ACcréditation) [131].

▪ **Spiruline ALGOSUD, produite en Camargue** (département de l'Hérault)

ALGOSUD est une unité de production d'algues d'eau douce sous serres en Petite Camargue. C'est aussi un lieu de culture de spiruline, sans recours aux produits phytosanitaires ni conservateurs. La ferme de Lunel est actuellement la plus importante unité de production de spiruline en France. Rémi Bosc est le responsable et il travaille avec Aurélien ; tous les deux sont des permanents de la ferme aquacole [132].

Ce site, situé aux portes de la Camargue, bénéficie d'un ensoleillement exceptionnel.

Comme le montre la figure 44, les bassins de culture de spiruline sont implantés sous 1 200 m² de serres.



Figure 44 : Serres de la ferme aquacole de Lunel (Hérault).

© Algosud.

Les propriétaires de cette ferme assurent apporter un soin extrême à tous les niveaux de production, notamment :

- ✓ En utilisant une eau provenant d'une source souterraine régulièrement contrôlée ;
- ✓ En réalisant des analyses complètes sur le milieu de culture ;
- ✓ En respectant un protocole strict tout au long des différentes étapes de la production ;
- ✓ En pratiquant des analyses bactériologiques et toxicologiques sur chaque lot de produits finis ;
- ✓ En faisant bénéficier chaque produit d'une traçabilité certifiant la qualité incomparable de la production.

Jusqu'à l'année dernière, les mois de récolte s'échelonnaient entre les mois de mai et décembre, avec des pics de production en été (10 kg de matière sèche par jour). La production annuelle était égale à une tonne.

Depuis environ un an, les serres sont équipées d'un système de chauffage qui permet une production toute l'année [133].

Les figures 45 à 48 représentent quelques étapes de la récolte : chaque matin en période de culture, le producteur fait passer une partie de l'eau du bassin à travers un filtre qui retient la spiruline (figure 45). Il laisse égoutter un moment avant de déposer la spiruline dans un deuxième tissu (figure 46).

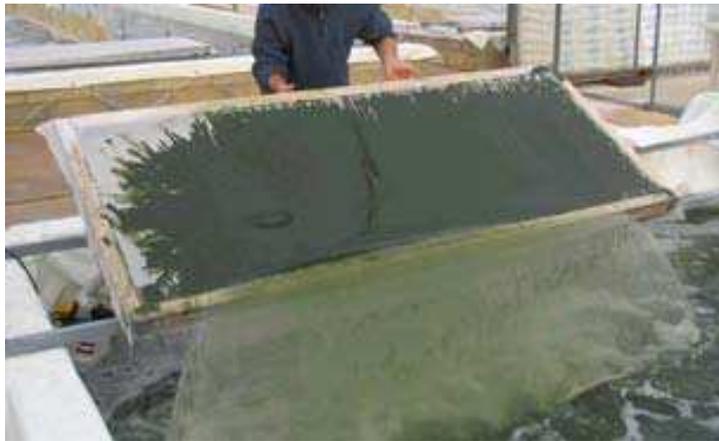


Figure 45 : Recueil de la spiruline cultivée, par filtration.
© Algosud



Figure 46 : Pâte de spiruline recueillie dans un tissu,
avant de pratiquer l'essorage. © Algosud

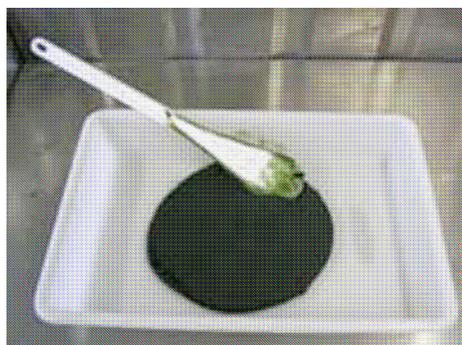


Figure 47 : pâte de spiruline essorée, prête pour être
transformée en longs spaghettis.
© Algosud



Figure 48 : Etape d'extrusion de la spiruline. © Algosud

Après l'opération d'extrusion (figure 48), la spiruline est répartie sur des clayettes, lesquelles sont ensuite placées dans un four. Le séchage par ventilation dure 8 heures et s'effectue à une température maximale de 40°C.

La spiruline produite est vendue en ligne sous la dénomination "spiruline de petite Camargue". La gamme de produits proposée est variée [134] :

- ❑ Spiruline en comprimés : pot de 200 comprimés (100 g) ;
- ❑ Spiruline en gélules : pot de 240 gélules (90 g) ;
- ❑ Spiruline concassée : pot de 100 g ;
- ❑ Spiruline en paillettes : pot de 100 g ;
- ❑ Spiruline à l'acérola en comprimés : pot de 200 comprimés (117 g) ;
- ❑ Spiruline au ginseng en comprimés : pot de 200 comprimés (116 g) ;
- ❑ Pâtes Bio* sans gluten, à la spiruline 4 % :
de forme "fusili", elles sont conditionnées en sachets de 250 g ; à noter que ces pâtes sont issues de l'agriculture biologique ;
- ❑ Pâtes Bio* à la spiruline 4 % :
de forme "farfalle", elles sont conditionnées en sachets de 250 g ; elles sont également issues de l'agriculture biologique.

- **Spiruline produite sur le site " la Capitelle "**, près de Lodève (département de l'Hérault)

La ferme appartient à Philippe et Estelle Calamand, lesquels cultivent la spiruline depuis 1998. A cette époque cette activité n'était pas administrativement reconnue. Le démarrage de leur activité a pu se faire après un long parcours du combattant à l'issue duquel ils ont obtenu le statut d'agriculteur, qui leur a permis d'exploiter leur 100 m², 200 m², puis actuellement 300 m² de surface de culture de spiruline [58].

La période de récolte s'étend sur 5 mois par an environ, en fonction des conditions climatiques.

L'agitation se fait par pompe vide-cave (250 Watts pour 70 m²) et l'extrusion est réalisée à l'aide d'un embauchoir à saucisse modifié. A noter aussi qu'une installation photovoltaïque alimente l'exploitation et leur maison située juste à côté.

Le couple assure lui-même le conditionnement et la vente de sa spiruline, sous forme de spaghettis droits. Une partie de la production est écoulée dans un magasin de produits diététique à Lodève, ainsi que dans 4 coopératives Bio du département ; une autre partie est vendue à une clientèle de particuliers, sur place ou par correspondance et, le restant, sur les marchés du Terroir pendant la saison touristique.

4.3.4 Quelques exemples de prix de vente de spiruline en France

Le laboratoire **Arkopharma** élabore des gélules à base de spiruline (figure 49), lesquelles peuvent être achetées en pharmacie.

Les indications inscrites sur la notice délivrée avec ce produit indiquent qu'il s'agit d'un "complément alimentaire de premier choix préconisé au cours des convalescences, des régimes amincissants, en cas de fatigue intellectuelle et de fatigue physique, notamment chez les sportifs".

La dose recommandée est de 2 gélules le matin, le midi et le soir.

Chaque gélule renferme 390 mg de poudre de plante entière de spiruline.

Deux conditionnements sont proposés : la boîte de 45 gélules (code CIP 7263180) à 7,40 € (soit 421 €/le kg de spiruline sèche) et la boîte de 150 gélules (code CIP 7263323) à 21 € (soit 359 €/le kg).



Figure 49 : Boîte de 45 gélules de spiruline vendues par le laboratoire pharmaceutique Arkopharma.

© Arkopharma 2008

Concernant la spiruline produite dans le sud de la France (Algosud, Filao etc.), les prix proposés sont dégressifs en fonction du nombre de sachets ou de lots achetés. Il faut compter actuellement (premier trimestre 2008), en moyenne, entre 13 et 15 € pour 100 g de poudre sèche de spiruline.

Quant aux produits à base de spiruline produite à l'étranger (Earthrise, Alpha Biotech, Cyanotech, Biorigin, Flamant Vert etc.), les prix de vente proposés intègrent le prix des produits, les frais de manutention, d'emballage et de conservation des produits ainsi que les frais de transport. Pour toucher un large public, ces produits sont mis en vente sur *internet*. On y trouve la spiruline aussi bien sous forme de comprimés, de gélules, de paillettes ou de poudre, que dans la composition de produits plus élaborés destinés aux animaux ou appartenant au secteur des cosmétiques. Plus le produit est élaboré, plus les prix s'envolent.

A titre indicatif, le site <http://shopping.cherchons.com/r/spiruline.html> propose un comparatif, actualisé quotidiennement, des prix de ventes de produits identiques sur le marché selon les différents fournisseurs.

4.4 Production en photobioréacteurs

La spiruline ayant besoin de chaleur pour pousser, la plupart des climats tempérés sont trop froids pour envisager sa culture dans des bassins de plein air durant toute l'année. Les lieux où elle peut être produite de façon économiquement raisonnable sont donc limités. Dans le but de la produire dans d'autres endroits du monde et d'étendre les périodes de culture, des chercheurs ont étudié, durant ces 20 dernières années, d'autres systèmes, et en particulier la production en photobioréacteurs (figures 50a et 50b).

La spiruline peut en effet être produite sous des climats plus froids, soit dans des bioréacteurs, soit dans des tubes transparents chauffant comme des panneaux solaires. Ces systèmes, dont les coûts de production sont encore élevés, ne sont utilisés que pour produire de la spiruline haut de gamme (très pure), dans le but d'en extraire ensuite des molécules à haute valeur ajoutée : le pigment phycocyanine, les antioxydants, les polysaccharides et les acides gras essentiels (notamment l'acide γ -linoléinique). Ces molécules sont utilisées dans les secteurs de la santé, de l'agroalimentaire et de la cosmétologie (cf. deuxième partie 1.).



Figures 50a (à gauche) et 50b : La photo de gauche représente un photobioréacteur industriel linéaire (© Microalgae S.p.a. Italy) ; celle de droite montre un photobioréacteur circulaire (© Addavita Ltd. UK) [135].

Un bioréacteur est la version biologique du réacteur chimique. L'existence d'une enceinte fermée permet le contrôle des principaux paramètres influençant la culture. Ce système de production en laboratoire existe déjà pour d'autres sources telles que des bactéries, des champignons ou des virus. Néanmoins, pour la production de spiruline, il s'agit d'un véritable défi technologique. En effet, la spiruline étant un micro-organisme photosynthétique, le réacteur doit être éclairé pour que la croissance ait lieu ; en d'autres termes, elle nécessite un photobioréacteur. Mais, la pénétration de la lumière est d'autant plus faible que la culture est plus concentrée ; la difficulté consiste donc à trouver le meilleur compromis entre concentration de la culture et productivité [136].

La production en photobioréacteurs contrôlés a comme principal avantage, le **maintien de la stérilité de la culture**, c'est à dire l'absence de contamination du réacteur par d'autres souches que celle que l'on désire cultiver. Pour ce faire, on commence par stériliser le réacteur et le milieu de culture contenant tous les éléments nutritifs essentiels à la croissance. Cette stérilisation est réalisée par mise en contact avec de la vapeur à 121°C pendant 20 minutes au minimum. Ensuite, on peut introduire l'inoculum de la souche à cultiver. A chaque nouvelle introduction de quelque chose dans le réacteur, il faut bien sûr veiller à conserver la stérilité obtenue [137].

Deux autres paramètres sont surveillés : la **température** et le **pH** ; la spiruline ayant une croissance optimale dans des conditions de température à 35°C et de pH compris entre 9,5 et 10,5, le maintien de la valeur de ces paramètres nécessite des mécanismes régulateurs. Un capteur et un actionneur sont donc utilisés : le capteur mesure la donnée que l'on souhaite réguler (la température ou le pH), et l'actionneur corrige un éventuel écart observé. Cette correction se fait au moyen d'une consigne, respectivement une électrovanne laissant circuler un liquide chaud ou froid, ou une pompe envoyant un acide ou une base. L'actionneur est lui-même commandé par un régulateur dans lequel on implante une loi de commande plus ou moins complexe qui permet de gérer l'écart observé entre la mesure du paramètre et sa consigne [137].

L'**agitation** est aussi un paramètre important qu'il faut d'ailleurs prévoir au moment de la conception ou du choix des bioréacteurs utilisables dans la production de spirulines. Comme dans le cadre des cultures en bassins, il faut s'assurer qu'il existe un brassage suffisant des cellules et du milieu de culture de façon à éviter l'existence de gradients de concentration ou de zones peu agitées qui ne fonctionneraient pas de façon optimale dans le réacteur. L'agitation du réacteur peut se faire par des moyens mécaniques ou pneumatiques (par injection de gaz). A noter qu'il existe aussi des réacteurs tubulaires dans lesquels l'agitation est essentiellement assurée par la turbulence de l'écoulement.

Le dernier paramètre, à connaître et à contrôler, est l'**intensité lumineuse incidente** sur le réacteur. Les réacteurs peuvent être éclairés soit par l'extérieur, à travers la paroi (énergie solaire ou lampes), soit par l'intérieur dans le réacteur (lampes directement dans le réacteur). C'est cette intensité lumineuse qui est à la base de la vitesse de production de la biomasse.

Deux grands types de fonctionnement existent pour les photobioréacteurs [137] :

- fonctionnement en discontinu (figure 51) : on introduit au départ une quantité définie et calculée de nutriments dans le milieu ainsi que l'inoculum, et on laisse croître la biomasse jusqu'à ce qu'elle épuise les constituants, ce qui termine la culture. Ce type de réacteur est donc totalement fermé jusqu'à l'épuisement du milieu de culture ; il faut le nettoyer pour démarrer un autre cycle.
- fonctionnement en continu (figure 52) : on alimente en permanence le milieu de culture avec du milieu frais tout en retirant parallèlement la biomasse produite, avec le même débit. Le volume dans le réacteur est donc constant.

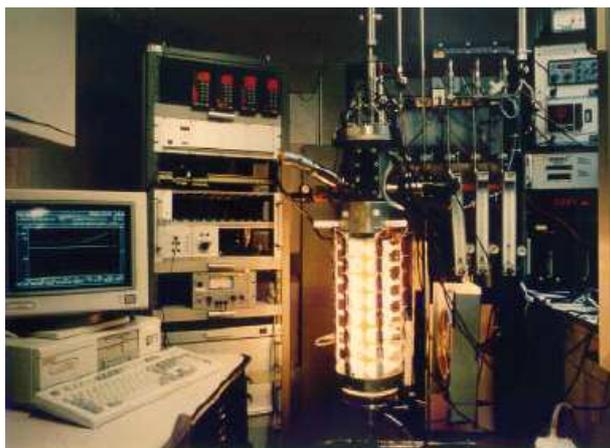


Figure 51 : Photobioréacteur du centre technique de l'Agence Spatiale Européenne (ESTEC) à Noordwijk (Pays Bas) dans lequel on cultive *Spirulina platensis* en discontinu. Il n'y a donc aucun réservoir de milieu frais pouvant alimenter le réacteur.



Figure 52 : Photobioréacteur (ESTEC, Noordwijk) fonctionnant en continu pour la culture de *Spirulina platensis*; on peut apercevoir les bidons d'alimentation en milieu frais et de récolte de la biomasse posés par terre.

La modélisation mathématique des différents types de photobioréacteurs est très utile pour les scientifiques, car elle leur permet de réaliser des simulations : grâce à un ordinateur, ils peuvent calculer ce que va produire le photoréacteur. Cette modélisation est également à la base du choix des dimensions du réacteur et de l'optimisation de celui-ci, dès lors que l'on cherche à concevoir un équipement répondant à des objectifs donnés [138].

Cette modélisation nécessite d'abord de connaître la vitesse de consommation et de production des principaux constituants impliqués dans la réaction biochimique (CO_2 , minéraux, O_2 , biomasse...). Il faut ensuite être capable de relier cette vitesse calculée aux flux de matière qui entrent et qui sortent du réacteur (ou qui s'y accumulent), pour calculer la productivité. Celle-ci est exprimée en grammes de produit par litre de réacteur et par heure.

Deuxième partie

La spiruline dans les pays industrialisés

1. Différents secteurs d'activité utilisant la spiruline

1.1 Industrie agroalimentaire

1.1.1 Complément alimentaire pour les sportifs, les végétariens et les personnes faisant un régime amaigrissant

1.1.1.1 Utilité chez les sportifs

La qualité de l'alimentation est une composante importante de l'équilibre des sujets sportifs. La diététique est l'art d'adapter l'alimentation aux besoins de l'organisme. Ces besoins sont comblés par l'apport en énergie calorique (principalement les glucides et les lipides), et l'apport en vitamines et oligo-éléments. Les vitamines et les minéraux jouent le rôle de cofacteurs des réactions de transformation des aliments en énergie.

Ainsi, chez les sportifs, une diététique spécifiquement adaptée peut optimiser la préparation et les facultés de récupération à l'effort. Une alimentation équilibrée et diversifiée permet de fournir à l'organisme une combinaison de macro et micro-nutriments d'origine variée, complémentaires les uns des autres.

Si une nourriture équilibrée suffit bien souvent pour pratiquer une activité physique, il en va autrement s'il s'agit d'un sport régulier et de compétition. Dans ce cas, à côté de cette alimentation, il est nécessaire d'apporter une supplémentation en certains éléments, de façon à couvrir tous les besoins.

Les besoins nutritionnels du sujet sportif sont globalement élevés, en rapport avec une augmentation des dépenses de l'organisme avec l'activité physique. En dehors de l'augmentation de l'apport calorique, les besoins concernent aussi les protéines, certaines vitamines et des micro-nutriments antioxydants.

Les besoins accrus en protéines s'expliquent par le fait que ces protéines sont à la base de la constitution des muscles. Un muscle strié est en effet constitué de cellules musculaires comportant un important matériel contractile composé de nombreuses myofibrilles ; ces myofibrilles sont des structures tubulaires allongées d'un diamètre de 1 à 2 μm , constituées de deux types de myofilaments : les filaments fins constitués d'actine associée à de la tropomyosine et de la troponine, et les filaments épais constitués de myosine. Par ailleurs, les muscles sont constitués de trois sortes de fibres musculaires [139] :

- **Fibres de type I** : ce sont des fibres oxydatives à contraction lente et résistantes à la fatigue. Elles contiennent beaucoup de myoglobine, de mitochondries et de capillaires. La myoglobine est le transporteur principal de l'oxygène dans les tissus musculaires ; c'est une protéine composée d'une chaîne unique de 153 acides aminés, contenant un noyau porphyrinique avec un atome de fer au centre.

- Fibres de type IIA : ce sont des fibres oxydatives à contraction rapide et résistantes à la fatigue. Elles contiennent beaucoup de myoglobine, de mitochondries et de capillaires mais, elles possèdent une coloration intermédiaire. Elles se retrouvent généralement en grand nombre dans les muscles de la jambe des athlètes ;
- Fibres de type IIB : ce sont des fibres glycolytiques à contraction rapide et sensibles à la fatigue. Elles contiennent peu de myoglobine, de mitochondries et de capillaires. Ces fibres, appelées fibres blanches, sont celles qui présentent le plus grand diamètre. Leur teneur en glycogène est élevée. Elles sont majoritairement situées dans les muscles du bras.

Le fait d'utiliser la spiruline régulièrement en complément de l'alimentation est intéressante à ce niveau : très riche en **protéines de haute digestibilité**, elle permet aux muscles de pouvoir récupérer plus facilement après l'effort. De plus, la masse musculaire se développe plus vite et présente une bonne qualité.

Par ailleurs, comme cela a été précisé dans la première partie (cf. 3.1.5.), la spiruline contient aussi quatre vitamines nécessaires au métabolisme énergétique et à la synthèse protéique : les **vitamines B1, B2, B3 et B6**. Les trois premières participent à l'utilisation des glucides (principal carburant du sportif) dans l'organisme via plusieurs voies de production d'énergie (métabolisme énergétique) ; elles permettent aux muscles de bénéficier de tout le glycogène dont ils ont besoin. La vitamine B6 est associée à la synthèse protéique ; elle est donc indirectement reliée à la performance sportive.

Concernant les agents antioxydants, les besoins sont accrus chez les sportifs. En effet, de par la grande consommation d'oxygène qu'il engendre, le sport crée une surproduction de radicaux libres. Cette production est une réaction normale, mais elle doit être "contrôlée" par un apport suffisant de nutriments de neutralisation.

De façon générale, les radicaux libres exercent une action nocive sur l'organisme, en stimulant le processus de vieillissement et en attaquant les cellules et le matériel génétique. Ils contribuent à augmenter les risques de cancer et de maladies cardiovasculaires. Dans le cadre de la pratique sportive, lors d'efforts physiques intenses, les radicaux libres s'accumulent, amplifiant les courbatures, les crampes et les risques de rupture tissulaire. Seuls des antioxydants permettent de contrecarrer leur action, en les interceptant et en les neutralisant.

Il est donc vivement conseillé aux sportifs de compléter leur alimentation en agents antioxydants.

D'après l'analyse nutritionnelle de la spiruline décrite dans la première partie (cf. 3.), on voit bien qu'elle peut s'avérer utile dans ce cadre, étant données les nombreuses sources d'antioxydants qu'elle fournit : **β -carotène** (10,4 mg pour 10 g), **vitamine E** (1 mg pour 10 g), **zinc**, **sélénium**, **vitamine C** et **enzyme SOD**.

Tous ces éléments sont de puissants antioxydants capables de lutter activement contre les radicaux libres.

Par ailleurs, le déficit en fer, avec ou sans anémie concomitante, est très fréquent chez les sportifs. Une incidence accrue a été démontrée dans la course à pieds, la natation, le ski, le patinage à glace, le football, la gymnastique ainsi que dans toute activité sportive intense, prolongée ou répétée. Or, le fer joue un rôle clé dans le transport de l'oxygène, par le biais de l'hémoglobine et de la myoglobine. Chez les sportifs, le glucose est le carburant et l'oxygène, le comburant.

Un déficit en fer a plusieurs causes, mais il correspond toujours à un apport alimentaire insuffisant pour couvrir les pertes. Or, chez les sportifs, les pertes sont accrues : il y a les pertes par hémolyse intravasculaire, les pertes gastro-intestinales, urinaires et sudorales. Les pertes digestives s'expliquent par des lésions traumatiques du tube digestif, liées à la pratique de certains sports. Par exemple, 50 à 80 % des marathoniens présentent du sang dans leurs selles. Les pertes urinaires concernent l'hématurie consécutive à l'augmentation de la filtration rénale avec l'exercice et aux lésions micro traumatiques de l'arbre urinaire ; elle est surtout observée chez les coureurs, triathlètes et cyclistes. L'hémoglobinurie, observée en cas de destruction des globules rouges vieillissants ou lipoperoxydés, correspond aussi à une perte de fer. De même que la myoglobinurie observée lors de la pratique intense de sports micro traumatiques (course à pieds sur un sol dur) [140].

Un déficit en fer peut affecter les performances, notamment dans les sports d'endurance. Il s'accompagne en effet :

- d'une augmentation excessive du taux sanguin de lactates ;
- d'une diminution du VO_2 max (volume maximal d'oxygène prélevé au niveau des poumons et utilisé par les muscles, par unité de temps) ;
- d'une diminution de la puissance maximale et de la capacité d'endurance ;
- d'une augmentation de la sensation de surcharge d'entraînement ;
- d'une diminution des capacités à se concentrer ;
- d'asthénie et fatigabilité musculaire.

Le déficit en fer altère donc la capacité physique à l'effort, l'endurance et la performance physique. Afin d'avoir une balance en fer équilibrée, les sportifs doivent avoir recours à la supplémentation car l'apport alimentaire seul ne suffit pas. Or, parmi les sels de fer, seul le fer ferreux est utilisable car les autres (sulfate, glutamate, citrate...) sont assez mal absorbés et nécessitent une quantité élevée pour corriger le déficit. Mais, à dose élevée, ils ont une action pro oxydante (production du radical hydroxyle très toxique pour les cellules). Ils sont aussi responsables d'effets indésirables digestifs, de par leur nature astringente.

Le **fer** contenu dans la spiruline est hautement biodisponible (cf. première partie 3.1.7.1). *A fortiori*, une spiruline enrichie en fer est encore plus indiquée.

Par exemple, la spiruline Végifer®, produite dans les montagnes de la cordillère des Andes et commercialisée sous la marque Flamant Vert, contient 600 mg de fer pour 100 g de poudre sèche.

Cette teneur, supérieure à celle des autres spirulines commercialisées résulte de l'absorption naturelle par *Arthrospira platensis*, du fer présent dans son milieu de culture [140].

La spiruline contient aussi du **magnésium** ; cet élément est nécessaire à la contraction et à la relaxation musculaire. Indispensable à la transmission de l'influx nerveux, le magnésium exerce aussi une action antifatigue et antistress. A noter que la vitamine B6 optimise l'assimilation du magnésium. Les sportifs sont exposés aux risques d'insuffisance magnésienne ; dans ce cas, la survenue de crampes est plus fréquente.

Le **calcium** est aussi un minéral important puisque l'augmentation de sa concentration intracellulaire permet la contraction des muscles squelettiques. La spiruline renferme également une quantité appréciable de calcium.

Pour toutes les raisons évoquées et pour son action énergisante, la spiruline constitue donc un complément alimentaire naturel de choix sur le plan de l'hygiène alimentaire du sportif, quel que soit son âge et son domaine.

Les sportifs consommateurs réguliers de spiruline déclarent en tirer les bienfaits suivants, comparativement à la période où ils n'en consommaient pas encore :

- ✓ une meilleure endurance,
- ✓ une récupération plus rapide après des efforts soutenus,
- ✓ de meilleures performances.

De plus, face aux nombreuses sources de compléments alimentaires existant sur le marché, la spiruline présente un triple intérêt pour les athlètes :

- sur le plan sanitaire : bien souvent, afin d'améliorer leurs performances, les athlètes ont recours à des produits industriels et étrangers sous forme de cachets dont une bonne partie est constituée d'additifs chimiques. A l'opposé, la spiruline commercialisée est toujours pure (au pire, certains comprimés renferment 1,5 % d'additifs). Bien entendu, la spiruline n'a rien à voir avec les produits dopants contraires à l'éthique sportive ;
- sur le plan de la sécurité alimentaire : la spiruline commercialisée étant soumise à des règles strictes, les sportifs ont l'assurance de consommer un produit sain.

- sur le plan nutritionnel : la spiruline pure est plus riche en vitamines, minéraux et oligo-éléments que les produits industriels ayant subi un traitement thermique de conservation détruisant les micro-nutriments sensibles. De plus, les micro-nutriments d'origine naturelle ont toujours une meilleure biodisponibilité que ceux d'origine synthétique amalgamés artificiellement en laboratoire.

Son utilisation par de grands athlètes est très répandue dans le monde.

Conseils d'utilisation :

utilisée en cure longue, la spiruline facilite la récupération après l'effort. En cure courte intensive, elle aide à la préparation d'une épreuve sportive. En fin de saison, son emploi permet de diminuer la sensation de fatigue physique et musculaire et les risques de crampes.

En fonction de l'entraînement, le sportif peut prendre 5 à 10 g de spiruline par jour (poudre sèche ou sous forme de comprimés). En cas d'efforts très intenses, la dose peut aller jusqu'à 20 g par jour (triathlon, marathon). Cette dose est à adapter en fonction de l'expérience de chaque sportif. La prise de spiruline juste après la compétition permet une meilleure évacuation des déchets et une récupération plus rapide [140][142]].

1.1.1.2 Utilité chez les végétariens

L'alimentation végétarienne se définit par l'exclusion des aliments provenant de la chair animale. Lorsqu'il s'agit de la suppression stricte de tous les produits d'origine animale (incluant donc les oeufs et les produits laitiers), on parle de végétalisme.

Le risque majeur d'un régime végétarien mal conduit est donc l'installation de certaines carences. Plus le régime est sévère et exclut des aliments, plus il est difficile de rééquilibrer le tout d'un point de vue nutritionnel. Les études montrent chez les végétariens et végétaliens, un taux souvent insuffisant en nutriments principalement apportés par les produits animaux [143] :

- le **fer** : le fer absorbable est celui lié à l'hémoglobine (fer héminique), protéine retrouvée exclusivement dans le monde animal (viandes rouges et poissons) ;
- la **vitamine B12** : en dehors de la spiruline, cette vitamine est exclusivement apportée par le monde animal (viandes).
- les **acides gras polyinsaturés** à longue chaîne appartenant à la famille des oméga-3 : acides docosahexaénoïque (DHA) et eicosapentaénoïque (EPA) ; on ne les retrouve que dans la chair des poissons gras ;
- le **calcium** : il est surtout présent dans les produits laitiers d'origine animale ;
- les **protéines** : les viandes et les poissons sont les sources les plus courantes et les plus importantes de protéines. Les végétaux peuvent apporter aussi des protéines, mais à l'inverse des protéines animales, les protéines végétales ne contiennent pas toujours tous les acides aminés essentiels dans les proportions nécessaires.

A moins de combiner astucieusement et régulièrement des protéines de légumineuse et des protéines de céréales, le sujet risque une carence en acides aminés essentiels ;

- la **vitamine A** : la forme active de la vitamine A (rétinol), directement utilisable par l'organisme, se trouve dans les produits animaux tels que l'huile de poisson et le foie. Un apport adéquat en protéines et en lipides est nécessaire à son absorption. Le règne végétal peut apporter des précurseurs de la vitamine A, essentiellement sous forme de b-carotène. Celui-ci doit être transformé par le corps pour être activé et utilisable par l'organisme ; pour cela il a besoin de matières grasses et de bile ;
- la **vitamine D** : elle existe sous deux formes, l'une synthétisée par la peau en présence de soleil et l'autre apportée principalement par le poisson.
- le **zinc** : les aliments les plus riches en zinc sont les poissons, la viande et les céréales complètes.

La supplémentation en spiruline (3 à 5 g par jour de façon continue) permet donc d'éviter les éventuelles carences liées aux régimes végétariens et végétaliens mal conduits.

1.1.1.3 Utilisation comme adjuvant de régimes amaigrissants

Dans le cadre d'un régime amaigrissant, les carences en micro-nutriments sont fréquentes car l'alimentation est souvent déséquilibrée, suite à des privations irraisonnées de certaines catégories d'aliments. C'est ce qu'on observe notamment dans les régimes restrictifs. Pour qu'un régime visant à perdre du poids n'engendre pas de carences, il faut conserver un apport nutritionnel équilibré et diversifié : tout est toujours une question de quantités.

Un régime basé sur la restriction des matières grasses entraîne généralement une insuffisance d'apport en acides gras essentiels et en vitamines liposolubles (A, D, E, K). Un régime supprimant ou limitant les produits laitiers peut entraîner une carence en calcium.

Bien souvent, les personnes qui font un régime se sentent fatiguées à cause des carences engendrées. La sensation de frustration, difficilement supportable lorsque les privations sont trop strictes, engendre souvent un comportement agressif de la part de ces personnes. Le risque des régimes restrictifs est l'"effet yo-yo" : plus le régime amaigrissant est court et efficace, plus la reprise de poids est importante dès la fin du régime, avec le retour aux habitudes alimentaires. Au fil des années, le sujet grossit car il prend toujours plus de kilos qu'il n'en perd.

La spiruline, grâce à son apport naturel et équilibré en vitamines, minéraux et oligo-éléments, peut donc être considérée comme une véritable alliée pour les personnes qui veulent entamer un régime.

De plus, par son effet détoxifiant (lié notamment à la présence de chlorophylle), elle aide à éliminer les toxines [144].

Après quelques jours d'utilisation, l'effet énergisant de la spiruline fait que la personne, non seulement ne se sent pas fatiguée (puisqu'elle n'est pas carencée), mais en plus elle se sent plus dynamique qu'avant le début de son régime.

Cette constatation émane de nombreux témoignages de femmes (et d'hommes aussi) qui l'ont testée [144].

Par ailleurs, la prise de 5 à 10 g de spiruline 20 à 30 minutes avant les repas, entraîne un sentiment de satiété lequel facilite le suivi d'un régime hypocalorique.

Ce phénomène est lié à sa teneur en phénylalanine (2,8 g pour 100 g de matière sèche) : cet acide aminé est métabolisé dans l'intestin en phényléthylamine, laquelle déclenche la sécrétion d'une hormone (la cholécystokinine) qui donne au cerveau un signal de satiété ; c'est en quelque sorte un coupe-faim naturel et sans danger [145].

1.1.2 Nourriture pour l'aquaculture et complément alimentaire pour certaines espèces animales

La spiruline n'est pas exclusivement réservée à la consommation humaine. Elle est en effet utilisée comme complément alimentaire chez les animaux de compagnie (chiens, chats), les chevaux, les vaches, les poules, les poissons et les oiseaux [146][147].

Concernant les chiens et les chats, la spiruline permet d'améliorer l'état de la peau et de rendre les poils brillants et plus résistants. Elle ouvre l'appétit des jeunes chiots et chatons, remet sur patte plus rapidement les mères qui viennent de mettre bas et rend plus vigoureux les sujets âgés et fatigués. Elle aide aussi à la régulation de l'appétit des chiens boulimiques. D'autre part, en vieillissant, les risques de décalcification augmentent ; il est possible de limiter les carences en calcium, en donnant de la spiruline à l'animal, en cures régulières deux ou trois fois par an, pendant cinq jours consécutifs [148][149].

La spiruline sous forme de poudre est ajoutée à la pâtée ; la dose dépend du poids de l'animal [150]:

- une cuillerée à soupe pour les chiens de grande taille
- une cuillerée à dessert pour les chiens de taille moyenne
- une cuillerée à café pour les chiens de petite taille et les chats.

La spiruline peut aussi être administrée sous forme de comprimés (un comprimé pour 10 kg).

Depuis quelques années, des aliments enrichis en spiruline sont commercialisés et il est possible de s'en procurer chez certains vétérinaires ou par *Internet* (Figures 53, 54a et 54b).



Figure 53 : Boîte de 200 g renfermant de la terrine pour les chats ; elle est faite avec de la viande biologique (47 % poulet et 5 % dinde) et de la spiruline a été ajoutée « pour purifier le corps des résidus toxiques ». Les inscriptions sur l'emballage indiquent qu'il s'agit d'un « repas complet et facile à digérer avec un mélange équilibré de vitamines et minéraux ». © zooplus AG.



Figures 54a (à gauche) et 54b : A gauche, pâtée pour chien préparée dans une boucherie bavaroise, à partir d'ingrédients naturels et frais. La variété "agneau + millet + courgettes" est enrichie en spiruline. A droite, pâtée pour chien contenant du poulet, du bœuf et de la spiruline. © zooplus AG.

Les propriétaires de chevaux de course ajoutent la spiruline (3 à 6 comprimés soit 1 à 2 g de poudre pour 100 kg) à leur nourriture, car elle a une action énergisante sur eux et leur permet de récupérer plus vite de leurs efforts prolongés. Ils l'utilisent aussi lorsque l'animal a été malade ou blessé, dans le but d'accélérer sa guérison (en moyenne 5 à 25 g par jour). D'un point de vue esthétique, leur robe devient plus brillante [151].

Les éleveurs de vaches laitières emploient la spiruline pour améliorer la flore intestinale, facteur important chez les ruminants. Son utilisation en complément de leur ration fourragère permet également de réduire la durée de l'antibiothérapie dans le cadre des mammites [151].

D'autre part, les éleveurs de bétail ayant constaté fortuitement qu'elle favorisait la production de sperme chez les taureaux et la fertilité des femelles, ils s'en servent aussi pour augmenter les taux de reproduction de leurs animaux. Cela leur permet d'avoir plus d'animaux à vendre.

Chez les lapins, les maladies respiratoires et intestinales accompagnées de diarrhée sont particulièrement fréquentes. Concernant les infections des voies respiratoires supérieures, les divers symptômes (rhinite, conjonctivite) sont regroupés sous le terme de syndrome respiratoire, appelé pasteurellose. Il s'agit d'une infection causée par la bactérie *Pasteurella multocida*. Les lapins infectés présentent des écoulements purulents au niveau des narines et/ou des yeux, accompagnés d'éternuements, de difficultés à respirer et de toux. L'infection, très contagieuse, doit être prise au sérieux car elle se complique assez souvent de septicémie ou se localise à d'autres endroits (oreille moyenne, abcès du cerveau ou cutanés). Les traitements antibiotiques sont longs, coûteux et peu efficaces. Globalement, les conséquences sont importantes, tant dans le cadre d'un élevage de lapins que d'une animalerie de laboratoire [152].

De nombreux lapins sont porteurs sains, la maladie ne se déclenchant que s'ils sont fatigués, soumis à un stress (le lapin stress facilement) ou placés malencontreusement dans un courant d'air.

L'ajout de spiruline à leur régime alimentaire permet d'augmenter efficacement leur résistance à cette infection. Evidemment, elle ne doit pas dispenser des mesures de prophylaxie habituelles pour cette maladie (hygiène de son environnement et de son alimentation, vaccination préventive)[153].

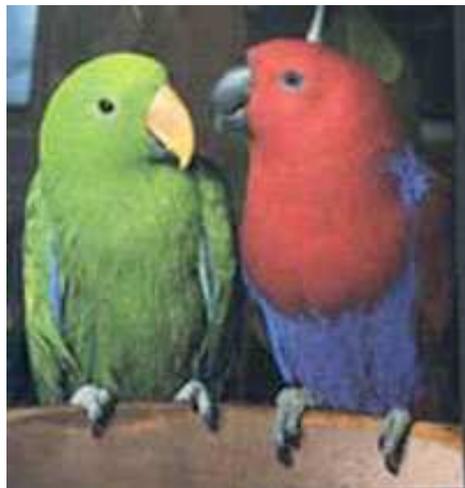
L'ajout de spiruline au régime alimentaire habituel des poules (jusqu'à 10 % de la ration) permet d'améliorer la qualité des œufs : ceux-ci sont notamment d'un jaune plus prononcé. Chez les poulets et autres volailles, elle permet d'améliorer la qualité de leur chair ; étant plus jaune, la viande a aussi un aspect plus engageant, ce qui facilite la vente aux consommateurs [151].

Les éleveurs d'oiseaux sont nombreux à supplémenter la nourriture humidifiée de leurs volatiles avec de la spiruline (100 mg par kg de poids corporel). Pendant la période de reproduction, elle favorise la croissance des oisillons et assure une meilleure protection contre les staphylocoques et *Escherichia coli* (colibacillose). Pendant la période de mue, elle permet de surmonter la fatigue physique et les états de stress (et leurs conséquences) qui affectent tous les oiseaux durant cette période délicate. De plus, elle favorise un plumage plus doux et plus solide. L'idéal est de l'utiliser à partir du début de la période de reproduction jusqu'à la fin de la période de mue [154].

Voici quelques précisions pour bien comprendre l'intérêt de la spiruline, plus particulièrement au moment de la mue. Si les oiseaux sont en bonne santé, la période de mue se déroule normalement. Il est essentiel de donner une nourriture bien équilibrée car cette étape est éprouvante pour les oiseaux. Le plumage représente environ 10 % du poids de l'oiseau. A titre d'exemple un canari normal possède environ 1 500 plumes, il est alors facile d'imaginer la débauche d'énergie que l'oiseau devra produire. Ce phénomène a souvent pour effet d'entraîner une perte de poids. C'est pourquoi l'apport de protéines et de sels minéraux est primordial pour garantir une bonne mue. En effet, les plumes sont constituées de kératine et l'aspect du plumage reflète l'état de santé de l'oiseau. Chez un oiseau malade ou souffrant de carence, la mue est souvent longue et partielle. Or, c'est de la qualité de la mue que va découler la valeur d'une bonne saison d'exposition ainsi que de la prochaine saison d'élevage [155]. De façon générale, les éleveurs d'oiseaux peuvent utiliser la spiruline comme complément alimentaire, afin [154]:

- d'améliorer leurs défenses immunitaires ;
- de favoriser leur rétablissement en cas de troubles liés à des carences ;
- de pallier aux états de fatigue liés aux mues, aux pontes et aux changements de saison ;
- d'apporter tous les éléments nécessaires à la croissance des petits ;
- de compenser chez les animaux âgés, une assimilation déficiente.

Concernant les oiseaux aux plumages très colorés vivant dans les zoos ou achetés par les amateurs, la spiruline permet d'obtenir de belles couleurs éclatantes (figures 55 à 57). C'est notamment le cas pour les perroquets, les perruches, les ibis, les flamants roses, les canaris, les chardonnerets, les inséparables...



Figures 55a (à gauche) et 55b : A gauche, la photographie représente deux éclectus. A droite, il s'agit d'un ara. Photographies de R. Low.



Figures 56a et 56b : Deux canaris de couleur ; celui de gauche est "rouge orange givré" et celui de droite est classé dans la catégorie "opale". © marmiche-Juin//2004.



Figures 57a et 57b : A gauche, un chardonneret - © chanly.apinc.org ; à droite un flacon contenant de la poudre de spiruline destinés aux oiseaux - spirulinasource.com © 1999 - 2004.

En aquaculture, la spiruline est utilisée pour l'enrichissement des granulés destinés à nourrir les poissons (figures 58a, b et c). Le Japon est le pays qui représente le plus grand marché de poissons d'élevage. Les éleveurs japonais sont nombreux à utiliser la spiruline dans l'alimentation de leurs poissons, car elle permet de pallier à deux inconvénients majeurs [156] :

- le risque d'infections et de maladies : la spiruline renforce leur résistance, en stimulant leur système immunitaire ; la conséquence est un moindre recours aux médicaments pour les soigner. Le taux de survie des jeunes poissons est aussi amélioré ;
- la saveur, la texture et la couleur de la chair des poissons d'élevage sont inférieures à celles des poissons sauvages ; la spiruline permet d'améliorer la qualité gustative et visuelle par l'obtention d'une coloration plus soutenue de leur chair ;

D'autre part, l'utilisation de la spiruline permet également un taux de croissance plus rapide chez les poissons, ainsi qu'une réduction des polluants dans les effluents : ceci est intéressant sur le plan environnemental et permet aussi aux exploitations piscicoles de diminuer le recours à des systèmes de traitements coûteux des effluents [157].

En aquariophilie, la première indication de la spiruline concerne la pigmentation qu'elle induit chez les poissons, notamment grâce à sa richesse en caroténoïdes. Ces derniers renforcent l'éclat de la couleur des poissons. Au Japon par exemple, elle est très prisée pour obtenir une pigmentation de qualité des poissons utilisés dans la préparation des sushis et des crustacés [156].

Par ailleurs, sa richesse naturelle en nutriments en fait un complément alimentaire bénéfique pour les poissons tropicaux d'aquarium.

Les éleveurs de poissons qui connaissent la spiruline pour l'employer depuis de nombreuses années, conseillent également de l'utiliser lors de la préparation des poissons à la reproduction. Son ajout dans la nourriture permet en effet d'augmenter les chances de reproduction de tous les poissons, tant en eau douce qu'en eau de mer. La réduction du stress chez les poissons constitue un autre effet bénéfique attribuable à l'utilisation régulière de spiruline [157].



Figures 58a (à gauche), 58b (au centre) et 58c (à droite) :

A gauche, aliment pour les poissons tropicaux, constitué de crisps enrichis d'un concentré en spiruline pour plus de résistance.

Au centre, aliment complet en comprimés, riche en spiruline, spécifiquement adapté aux poissons de fond herbivores.

A droite, alimentation complète naturelle, riche en spiruline, spécialement adaptée aux besoins alimentaires des Locaridés : *Plecostomus*, *Otocinclus* et *Ancistrus* et autres poissons de fonds herbivores. Elle se présente sous forme de disques de 11 mm de diamètre qu'on dépose au fond de l'aquarium ; ils se dissolvent très lentement pour ne pas troubler l'eau. © Spectrum Brands, Inc.



Figures 59a (à gauche) et 59b : A gauche, boîte de 200 comprimés à la spiruline destinés à l'alimentation des poissons d'agrément. Il est possible de les coller à la vitre de l'aquarium pour nourrir les poissons au niveau désiré ou de les laisser tomber pour nourrir les poissons du fond. © 2007 Ciao GmbH.

A droite, comprimés à la spiruline destinés à tous les poissons tropicaux. © Hagen.com.

Pour tous les aliments enrichis en spiruline 3 à 5 % (figures 59 et 60), la notice mentionne que le concentré naturel d'algue favorise la digestion et la vitalité des poissons, tout en renforçant leur résistance immunitaire. Il est aussi spécifié que les aliments sont fabriqués à basse température (75°C), contrairement aux alimentations courantes qui sont fabriquées entre 135 et 155°C ; ceci permet une meilleure préservation des éléments nutritifs et des vitamines naturelles (principalement A, B, D). D'autre part, le ratio protéines/lipides est optimisé pour améliorer l'assimilation par l'organisme, de façon à limiter les déchets organiques des poissons et donc conserver une eau plus claire plus longtemps [158].



Figures 60a (à gauche) et 60b : A gauche, "GALA" est une nourriture principale, de qualité supérieure, sous forme de flocons pour poissons exotiques.

Elle est enrichie en spiruline et contient de la vitamine C stabilisée.

A droite, "Spirulina Dajana" s'utilise pour la préparation de nourriture ou directement pour l'alimentation des nauplies d'artémia, artémia adultes ou toutes petites crevettes vivantes. Elle peut aussi être additionnée à la nourriture congelée habituellement utilisée. © 2000-2007 AQUARIOFIL.COM - SARL.

Il existe aussi une espèce particulière de poisson pour laquelle la spiruline est très utilisée : la carpe Koï (Figure 61).

Au Japon, depuis plus de 2000 ans, les carpes sont domestiquées et élevées, en alternance, dans les rizières en terrasse des fermes. Les cultivateurs de riz les élevaient pour les manger, mais entre 1820 et 1830, ils ont commencé à élever et croiser des poissons présentant des mutations de couleur. Les fermiers conservaient les poissons les plus colorés comme animaux de compagnie, pour le plaisir des yeux. La carpe possède un certain polychromatisme. Certaines couleurs ont été obtenues par sélection génétique : variétés ornementales avec du rouge, bleu, orange, jaune, blanc, noir... Cette création de variétés de différentes couleurs a progressivement étendu leur renommée et, petit à petit, les Koï furent admirés par un nombre croissant de japonais. En 1974, l'empereur Hirohito en choisissant de mettre des Koï dans les douves du palais Impérial, a contribué grandement au développement de nouveaux élevages [159].

Au cours du XX^{ième} siècle, le commerce des variétés colorées et sélectionnées s'est développé fortement. Les pays possédant déjà une connaissance de l'élevage des carpes (Israël, Asie, Malaisie, Indonésie et autres pays asiatiques chauds) se sont également lancés dans ce commerce lucratif.

Les méthodes d'élevage des Koï sont inspirées de l'aquaculture traditionnelle (grossissement rapide en vue de la consommation) et portent au départ sur des carpes originaires d'Asie Mineure (corps allongé). Par la suite, elles ont été croisées avec d'autres variétés au corps plus trapu, en provenance d'Europe (Allemagne) et habituées à des températures plus basses [159].

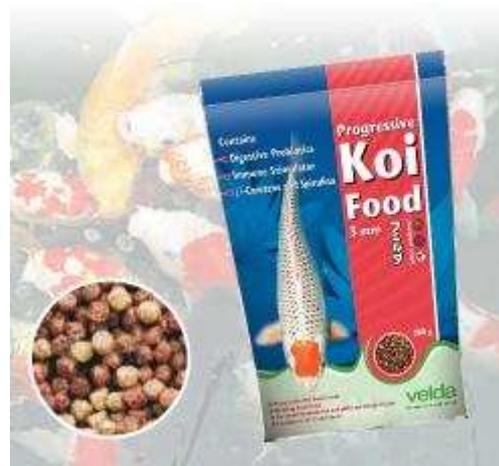


Figure 61 : Photographie d'une carpe Koï mâle mesurant 80 cm. © koitropic.com

Comme leurs ancêtres les Cyprinidés, les carpes Koï sont omnivores et dépourvues d'estomac. Elles utilisent les enzymes qu'elles trouvent dans les insectes, pour leur digestion [160]. Elles aiment donc fouiller dans le sol naturel, pour y trouver des petits insectes, des vers de vase, des escargots aquatiques, des larves de moustique ou des daphnies etc[161]. Cette diversité de nourritures vivantes étant très réduite dans les bassins artificiels (car dépourvus de sol naturel), il est donc indispensable d'alimenter les Koï avec une nourriture de substitution. Celle-ci doit apporter idéalement tous ces éléments naturels, avec un enrichissement en protéines, végétaux, vitamines, oligo-éléments, et surtout enzymes (figures 62a et 62b) [162].

La spiruline est donc parfaitement adaptée aux exigences nutritives de ces carpes. D'ailleurs, les grands spécialistes japonais la recommandent vivement. Son utilisation régulière en complément de l'alimentation permet d'une part d'obtenir la garantie de poissons plus robustes et sains, et d'autre part, de renforcer les motifs rouges et jaunes des Koï (sans influencer le blanc pur et brillant du fond). La dose de spiruline conseillée pour cette indication doit être comprise entre 5 et 20 % de la ration alimentaire quotidienne [162].

Diverses formules sont commercialisées ; les granulés "Spirulina plus" contiennent par exemple les ingrédients suivants : spiruline (4 %), crevettes, farine de végétaux et de froment, huile de poisson, vitamines A, D3, E et C, oligo-éléments, anti-oxydant [163][164].



Figures 62a (à gauche) et 62b : A gauche, pot de 1 litre renfermant de la nourriture à base de spiruline, destinée aux carpes Koi élevées en bassins artificiels.

© Gooster 2003-2007.

A droite, nourriture pour carpes Koi, enrichie en bactéries probiotiques, spiruline et bêta-carotène.

© Velda.com [165]

La nourriture représentée par la figure 62b, est essentiellement constituée de produits à base de poissons et de fruits de mer, de protéines végétales, de graisses et d'hydrates de carbone. Elle est enrichie en oligo-éléments et vitamines, dont la vitamine C stabilisée. Les bactéries probiotiques ont été ajoutées en raison de leur grande efficacité dans l'assimilation et la bonne digestion des constituants alimentaires ; cela conditionne dans une large mesure le bien-être animal des carpes. De façon à renforcer leur système de défense immunitaire et à réduire au minimum leur sensibilité aux maladies, la préparation est aussi enrichie d'un stimulateur immunitaire. Le β -carotène et la spiruline sont ajoutés pour renforcer le contraste des couleurs [165].

A noter aussi que la composition particulière de cette nourriture fait qu'elle ne trouble pas l'eau et n'affecte pratiquement pas le biotope du bassin et sa filtration. Les carpes sont nourries plusieurs fois par jour avec cette nourriture, en sachant qu'une dose correcte doit pouvoir être assimilée en cinq minutes [165].

Au Japon les éleveurs de Koi travaillent dans de véritables fermes aquatiques. Certains sont spécialisés dans telle ou telle variété, d'autres recherchent à obtenir de nouvelles variétés aux couleurs toujours plus prononcées (figure 63).

En Chine et au Japon, mis à part les carpes Koi, le fait d'ajouter de la spiruline à la nourriture de tous les poissons d'élevage est considéré comme un bon investissement puisqu'au final ils peuvent vendre les poissons plus chers. Les éleveurs de Koi reçoivent en guise de récompense des médailles lors de concours organisés régulièrement [159].

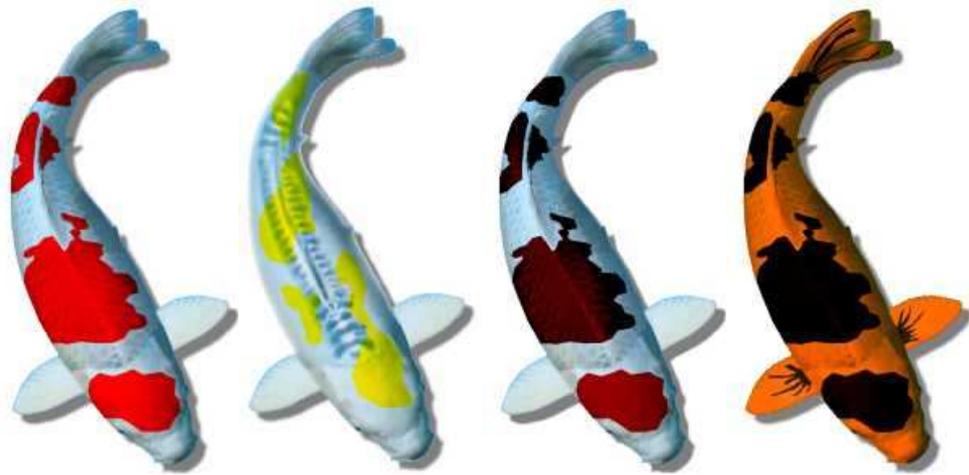


Figure 63 : Photographie de quatre carpes Koï dont le régime alimentaire contient entre 5 et 20 % de spiruline ; on peut effectivement constater que les couleurs (rouge, jaune, orange) sont éclatantes et que le fond blanc brillant est très contrastant pour les trois premières. Ph. Guillet ©. [166]

1.1.3 Colorant alimentaire

Grâce aux pigments naturels que l'on sait extraire des spirulines, on obtient des colorants naturels utilisables notamment dans l'industrie alimentaire. Trois pigments peuvent être extraits, mais actuellement c'est le premier cité ci-dessous qui est le plus utilisé dans cette indication ; les deux autres pigments sont plutôt utilisés dans le domaine pharmaceutique (cf. deuxième partie 2.).

- La **phycocyanine** : c'est un pigment retrouvé exclusivement chez les cyanobactéries, la spiruline étant celle qui en renferme le plus (10 à 15 %). Cette substance hydrosoluble donne une couleur bleue lorsqu'on la mélange à de l'eau.
Le bleu est une couleur primaire recherchée car très rare dans la nature. On l'utilise aussi pour obtenir, en le mélangeant à d'autres couleurs, des tons différents. Au Japon, divers aliments renfermant de la phycocyanine extraite de spirulines, sont commercialisés sous la marque "Linablue" créée par le groupe Dainippon Ink and Chemicals ; on peut citer par exemple des chewing-gums, sorbets, sucettes glacées, bonbons, boissons sans alcool, gelées et produits laitiers [167].
- La **chlorophylle** : c'est un pigment vert abondant dans le monde végétal : tous les végétaux à feuilles renferment environ 2 g de chlorophylle a par kilogramme de feuilles fraîches. Elle est extraite depuis longtemps à partir des plantes herbacées, luzerne ou encore les orties. La spiruline, avec sa teneur de 1 % en chlorophylle a, présente un meilleur rendement. Néanmoins, elle reste encore peu utilisée en Europe.
- Les **caroténoïdes** : ce sont des pigments orangés qui sont actuellement extraits à partir de certains végétaux (carotte, potiron, courge).

Les colorants font partie de la classe des additifs alimentaires ; ils sont utilisés dans le but de renforcer ou conférer une coloration aux aliments, afin de rendre leur aspect plus attractif. Comme pour les trois autres classes d'additifs, une réglementation existe : certains sont carrément interdits, et pour ceux qui peuvent rentrer dans la composition d'un aliment, une dose journalière admissible est calculée, de façon à établir une sécurité alimentaire. La réglementation diffère cependant selon les pays car les scientifiques ne sont pas tous d'accord sur leur toxicité potentielle à plus ou moins long terme.

Les colorants alimentaires peuvent être d'origine naturelle ou synthétique ; ils sont identifiables sur l'étiquetage des aliments, par le code E suivi d'un nombre compris entre 100 et 180 (par exemple E 141 pour le vert chlorophylle et E 160 pour les caroténoïdes).

Lorsqu'ils sont d'origine naturelle, ils peuvent provenir du monde minéral, végétal ou animal. Les traitements industriels nécessaires à leur extraction et leur purification sont coûteux. De plus, l'origine naturelle n'exclut pas automatiquement les dangers pour les consommateurs.

L'origine synthétique est souvent préférée car la fabrication se révèle généralement moins onéreuse. Mais, si lors de la synthèse, les conditions optimales de sécurité ne sont pas réunies, la consommation de l'aliment peut s'avérer dangereuse (par exemple si la fabrication exige des solvants, lesquels ne sont pas entièrement éliminés dans le produit fini). Ainsi, à distance de leur mise sur le marché, il a été établi que de nombreux colorants chimiques étaient cancérogènes.

Les effets secondaires les plus fréquemment rencontrés après la consommation d'aliments renfermant certains colorants sont : les réactions allergiques (asthme, urticaire), une toxicité dirigée sur certains organes, un effet cancérigène et/ou génotoxique.

L'extraction de la phycocyanine à partir de la spiruline se fait après culture en photobioréacteurs. Ce colorant est couramment utilisé au Japon, en Chine et en Thaïlande. En Europe, la phycocyanine représente le seul colorant bleu naturel autorisé dans l'industrie alimentaire. Aux Etats-Unis, la FDA exigeant un long et coûteux processus d'approbation pour l'emploi des colorants naturels dans l'alimentation, la phycocyanine extraite de la spiruline est encore très peu utilisée par rapport aux colorants chimiques [5][167].

1.2 Industrie cosmétique

La phycocyanine extraite de la spiruline est aussi utilisée dans le domaine de la cosmétologie, notamment pour la variété de couleurs qu'elle peut donner lors de son mélange avec d'autres composés. Depuis de nombreuses années, elle rentre ainsi dans la composition de rouges à lèvres et de crayons pour souligner les yeux, disponibles sur le marché asiatique. En Europe, le marché est moins développé car plus récent [167]. Par ailleurs, la spiruline renferme toutes les vitamines et minéraux nécessaires pour avoir une peau, des cheveux et des ongles sains.

Ainsi, en utilisant de la spiruline en complément d'une alimentation équilibrée, la peau devient plus nette et fraîche, les cheveux retrouvent vigueur et brillance, tandis que les ongles fortifiés cassent moins facilement [168].

De façon un peu plus détaillée, sa teneur en vitamine A permet un bronzage plus rapide et plus uniforme au soleil. Sa teneur en vitamine B5 permet à la peau de conserver son hydratation et sa souplesse ; elle aide aussi à renforcer les cheveux contre les agressions chimiques et mécaniques. La vitamine B8, en diminuant l'excrétion de sébum, réduit la principale cause de chute des cheveux [168].

Les figures 64a et 64b représentent des spécialités de cosmétiques intégrant de la spiruline dans leur formulation ; elles sont commercialisées en France.



Figures 64a (à gauche) et 64b : A gauche, masque vivifiant et purifiant au kiwi et à la spiruline. Il élimine les impuretés et peaux mortes et apporte les vitamines naturelles pour une peau nette et éclatante. © Le club santé 2007.

A droite, Sérum bleu contenant un extrait liquide de spiruline fraîche à teneur garantie en phycocyanine. Ce complément possède de puissantes propriétés antioxydantes, antiradicalaires, détoxifiantes et immunostimulantes. La notice d'emploi conseille de prendre une ampoule diluée dans un demi verre d'eau, le matin, pendant 14 jours et de renouveler la cure plusieurs fois dans l'année, aussi souvent que nécessaire. © easy parapharmacie.com

D'autre part, grâce à ses composants capables de lutter contre les effets néfastes des radicaux libres (notamment le vieillissement), la spiruline fait l'objet de recherches menée par certains laboratoires. Parmi ces éléments antioxydants, la SOD, le β -carotène, la vitamine E, le sélénium et le zinc exercent une action synergique bénéfique en préservant l'ensemble des cellules de l'organisme contre l'action des radicaux libres. En évitant la dégénérescence cellulaire, on peut donc retarder les effets du vieillissement. Jusqu'à présent, cet aspect de la spiruline est surtout envisagé par le biais d'une supplémentation par voie orale. La prévention des effets du vieillissement cutané par les éléments précédemment cités de la spiruline, n'est pas encore beaucoup développée sous la forme topique.

Récemment en France, le laboratoire Jade Recherche, lequel étudie depuis quelques années la phycocyanine, a réussi à mettre au point un extrait liquide de spiruline titré en phycocyanine. Ce laboratoire a également développé une "crème cosmétique Soleil Bleu" renfermant de la phycocyanine, dont l'effet protecteur est utilisé pour combattre les rayonnements UV, générateurs de radicaux libres et d'oxydation. Cette crème contient aussi de l'aloé vera. Elle est nutritive et favorise le renouvellement cellulaire. En plus de la crème, il est conseillé d'utiliser les ampoules (5 ml) contenant l'extrait liquide de spiruline titré en phycocyanine (9,5 mg), soit par voie interne, soit en application sur la peau. Dans ce cas, on peut parler de cosmétique intelligente et performante car elle associe cosmétique interne et externe [169].

Par ailleurs, la spiruline renferme une teneur élevée en acide γ -linoléique (cf. première partie 3.1.2.2.). Cet acide gras essentiel polyinsaturé est indispensable à l'Homme car son organisme ne sait pas le fabriquer. Or, il exerce une action thérapeutique importante sur le derme : atténuation de certains phénomènes inflammatoires (notamment après des brûlures) et amélioration de la qualité des cicatrifications cutanées. Cet acide étant très rare dans la nature (onagre, bourrache, cassis), son extraction à partir de la spiruline pourrait constituer une offre intéressante pour l'industrie cosmétique.

1.3 Médecine

1.3.1 Diagnostic biologique

Comme cela a été décrit au début de la première partie, la spiruline renferme des pigments photosynthétiques. Parmi eux, les phycobiliprotéines, telles que la phycoérythrine (rouge) et la phycocyanine (bleue) sont extraites. Ces pigments sont utilisés comme marqueurs fluorescents dans le dépistage de certaines maladies (cancer, détection dans les dons de sang d'une éventuelle contamination par le virus du SIDA) et dans le domaine de la recherche médicale. Ce sont en effet des colorants fluorescents stables, hydrosolubles et extrêmement sensibles [170].

Ces molécules fluorescentes peuvent facilement être liées à des anticorps monoclonaux. Le biologiste n'a alors plus qu'à suivre leur cheminement à l'intérieur du corps humain ; lorsque l'anticorps se fixe sur un récepteur de cellule ou de tissu, la fluorescence du pigment associé permet d'observer l'aspect cytologique des cellules situées à cet endroit.

Ces extraits sont issus de spiruline cultivée en photobioréacteurs. On les retrouve dans des kits de diagnostics médicaux et également dans les techniques de cytométrie de flux.

En 2000, le coût de l'extrait purifié en phycoérythrine ou en phycocyanine, destiné à cet usage, se situait entre 30 000 et 70 000 \$ US/kg [170]. En dépit de ce prix très élevé, la demande est en progression constante chaque année. Ceci s'explique sans doute par le fait que ces marqueurs sont 10 à 30 fois plus intenses que les marqueurs conventionnels ; de plus, ils constituent une alternative aux marqueurs radioactifs peu populaires.

1.3.2 Recherche génétique

La spiruline contient beaucoup d'enzymes. Parmi elles, trois endonucléases de restriction ont été découvertes. Elles agissent comme des ciseaux pour couper l'ADN des microbes envahisseurs. Les chercheurs pensent que c'est grâce à ces enzymes que la spiruline existe depuis plus de trois milliards d'années : elle s'en est probablement servie pour dégrader l'ADN d'ennemis écologiques (bactéries, virus) qui avaient pénétré dans ses cellules [171].

Ces enzymes coupent les molécules d'ADN bicaténaire au niveau de séquences nucléotidiques très précises.

Parmi les trois endonucléases retrouvées dans la spiruline, une est spécifique car elle n'est retrouvée dans aucune autre espèce de bactérie, champignon ou algue ; elle a donc été appelée "Spl-1"[172].

Les scientifiques japonais l'extraient de cultures de spiruline en photobioréacteurs et la vendent dans les laboratoires de recherche génétique. Les deux autres enzymes de restriction peuvent être extraites à partir des micro-algues *anabaena* et *nostoc*.

Ces enzymes sont utilisées dans des expériences de recombinaison génétique *in vitro* pour introduire des séquences d'ADN d'origines diverses dans des plasmides [171].

1.4 Environnement

1.4.1 Diminution de la pollution environnementale (de l'atmosphère et des sols)

La pollution atmosphérique est un problème planétaire qu'il convient de s'efforcer de résoudre pour ne pas hypothéquer la vie des générations futures. Parmi le vaste programme de protection de l'environnement, la limitation de la production des gaz à effet de serre (GES) est un sujet important et d'actualité.

Voici en quelques mots ce qu'est l'effet de serre. La plus grande partie du rayonnement solaire traverse directement l'atmosphère pour réchauffer la surface du globe. La terre, à son tour, renvoie cette énergie dans l'espace sous forme de rayonnement infrarouge de grande longueur d'onde. La vapeur d'eau, le gaz carbonique, et d'autres gaz absorbent ce rayonnement renvoyé par la terre, empêchent l'énergie de passer directement de la surface du globe vers l'espace, et réchauffent ainsi l'atmosphère. L'augmentation de la teneur atmosphérique en GES peut donc se comparer à la pose d'un double vitrage : si les apports de rayonnements solaires à l'intérieur de la serre restent constants, la température s'élèvera.

Les principaux GES émis par l'activité humaine sont [173] :

- le gaz carbonique (CO₂) : 64,2 % de part de responsabilité dans le réchauffement climatique ;
- le méthane (CH₄) : 19,3 % ;

- les chlorofluorocarbures (CFC, qui ont également pour effet d'appauvrir la couche d'ozone) : 9,5 % ;
- le protoxyde d'azote (N₂O) : 4 %.

Une des conséquences de l'émission excessive de ces gaz est le réchauffement climatique. Les climatologues prévoient une augmentation de la température moyenne du globe de 2°C entre 1990 et 2100 en cas de doublement de la concentration des GES dans l'atmosphère [174]. Dans l'hypothèse où rien ne serait entrepris pour limiter l'augmentation de leur concentration dans l'atmosphère, un réchauffement beaucoup plus élevé pourrait être à prévoir. Or, on sait qu'une variation de seulement quelques degrés de la température moyenne de la planète, engendre déjà une profonde transformation de sa physionomie.

Les incidences du réchauffement climatique sont par exemple [174] :

- la fonte d'une partie des glaciers polaires et l'élévation du niveau des mers ;
- la perturbation du cycle de l'eau avec pour conséquence l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des catastrophes naturelles d'origine climatique (canicules, sécheresses, inondations, tempêtes, cyclones). Les famines peuvent devenir omniprésentes dans certains secteurs ;
- la recrudescence et le déplacement géographique de certaines maladies infectieuses, suite à l'élévation de la température et à la multiplication des inondations (paludisme, dengue, fièvre jaune, encéphalites à tiques, salmonellose, choléra) ;
- la modification des courants marins : le ralentissement du *Gulf Stream* au niveau du nord de l'océan atlantique, aurait pour conséquence un fort refroidissement de la température moyenne en Europe occidentale tandis que la température aurait tendance à s'élever dans le reste du globe ;
- la baisse de la biodiversité avec disparition des espèces animales et végétales qui ne seront pas capables de s'adapter rapidement au changement. La physionomie de l'écosystème changeant, les espèces animales et végétales restantes évolueront inévitablement ;
- un coût économique important : aux coûts directs (dégâts des tempêtes, par exemple), s'ajoutent les coûts d'adaptation (construction de digues, modification des cultures, etc.).

Suite au protocole de Kyoto ratifié le 10 décembre 1997, les pays développés signataires se sont engagés non plus à stabiliser leurs émissions de GES, mais à les réduire (objectifs quantifiés avec échéances calendaires). Les états-membres de l'union européenne ont décidé de répartir leurs efforts en fonction de leur niveau d'émission de 1990, de leur démographie, ou de leur besoin de développement économique [175].

Les pays industrialisés ont une responsabilité particulière dans l'accumulation des émissions de ces gaz dans l'atmosphère, depuis la révolution industrielle.

En effet, elle résulte de l'utilisation intensive des combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon). A l'heure actuelle, plus de 70 % de la consommation énergétique mondiale est tirée des énergies fossiles alors que 0,2 % seulement est fournie par le soleil. Les pays industrialisés et les pays dits "de transition" (Chine, Inde) émettent plus des deux tiers des GES.

A noter que les pays industrialisés sont aussi ceux qui possèdent les meilleures technologies disponibles pour réduire ces émissions.

Le CO₂ est, de loin, le plus important des GES d'origine anthropique ; il est actuellement responsable de 80 % de l'effet de serre imputable aux pays industrialisés. Chaque année, 24 milliards de tonnes de CO₂ sont libérées dans l'atmosphère. Les forêts et les océans ne suffisent plus à les réabsorber, c'est donc 3,2 tonnes de CO₂ ainsi que d'autres gaz qui s'accumulent chaque année, créant l'effet de serre [173].

Or, contrairement à d'autres GES, on ne connaît pas encore de procédés efficaces de capture. En effet, les technologies chimiques existantes de capture du CO₂ ont un coût élevé [176].

A moyen terme, on pensait que d'autres technologies pourraient permettre de réduire ces coûts. Mais, des études ont montré que le rendement d'une centrale électrique thermique équipée de systèmes de capture serait environ 15 % moindre, ce qui pourrait majorer de 30 % le coût du kilowattheure produit. En outre, la capture du CO₂ entraîne une surconsommation énergétique, donc une surproduction de CO₂. Enfin, ces technologies ne pourraient concerner que des grandes installations fixes.

Par ailleurs, le stockage du CO₂ est également envisagé dans des gisements d'hydrocarbures épuisés, dans les nappes aquifères ou dans les océans ; cette dernière formule repose sur l'idée d'accélérer le processus naturel d'absorption du CO₂ par les océans, en y injectant du CO₂ et en espérant qu'il y séjournera plusieurs centaines d'années avant de se redégager dans l'atmosphère. Outre leurs difficultés techniques et leur coût élevé (lié au transport du CO₂), ces injections, ne sont envisageables que pour les émissions d'installations fixes (en raison de la nécessité de récupérer le CO₂ émis). Ces solutions de stockage génèrent aussi de nombreuses incertitudes quant à leur impact sur l'environnement.

Il apparaît donc nécessaire de favoriser le développement des "puits" de carbone [177] ; les solutions les plus couramment évoquées sont :

- la réduction du déboisement,
- la préservation du couvert forestier existant,
- le développement du reboisement,
- le remplacement (aussi souvent que possible) du ciment et de l'acier par le bois, dans les domaines de la construction et de l'ameublement. En effet, le bois est un matériau qui fixe le carbone, alors que la production des autres matériaux émet des GES dans l'atmosphère.

A côté de ces solutions, la spiruline devrait avoir aussi sa place. En effet, puisqu'elle a permis la vie sur Terre il y a 3 milliards d'années, par le biais de la réduction du gaz carbonique et l'introduction de l'oxygène dans une atmosphère comprenant uniquement du CO₂, du méthane, de l'ammoniaque et de l'hydrogène, pourquoi ne servirait-elle pas à absorber une partie de l'excès de CO₂ émis ?

On sait que pour atteindre un rendement optimal de croissance, la spiruline a besoin de CO₂ en grande quantité, que ce soit pour sa culture en bassins ou en photobioréacteurs. En couplant les bassins à des centrales thermiques classiques productrices d'électricité (centrales au charbon par exemple, qui rejettent en moyenne 13 % de CO₂), le CO₂ émis peut être assimilé par la spiruline plutôt que de s'échapper dans l'atmosphère [178]. Ce procédé permet également le traitement des eaux usées de la centrale puisque les nitrates et phosphates sont des éléments nécessaires au milieu de culture de la spiruline [179].

Des projets ont déjà été testés à petite échelle [180] ; il serait bien de poursuivre les études afin de pouvoir développer des cultures de spiruline couplées aux structures industrielles grandes émettrices de CO₂.

Le protoxyde d'azote **N₂O** est un puissant gaz à effet de serre dont le pouvoir de réchauffement global sur 100 ans est 310 fois plus élevé qu'une masse équivalente de CO₂. La cause première des émissions de N₂O provient essentiellement des phénomènes de nitrification / dénitrification dans les sols cultivés notamment du fait de l'utilisation d'engrais azotés minéraux et de la gestion des déjections animales. Les émissions en provenance du secteur de l'industrie chimique constituent aussi une source importante de N₂O : fabrication de glyoxal, d'acides adipique, glyoxylique et nitrique. A noter que la part attribuée au trafic routier est en forte hausse du fait de la généralisation des pots catalytiques sur les voitures.

Les émissions de **CH₄** proviennent essentiellement du lisier, de la digestion du bétail et des déchets (notamment des décharges).

La spiruline présente un intérêt car elle pourrait permettre, dans une certaine mesure, de réduire ces deux types d'émissions. En effet, comme cela a été décrit dans la première partie, la culture de la spiruline présente certains avantages :

- elle ne nécessite aucun engrais chimique donc il n'y a pas de risque d'émission de protoxyde d'azote ;
- elle permet d'obtenir une grande quantité de protéines pour une consommation faible d'eau (figure 65) ;
- elle constitue une alternative aux cultures céréalières et à l'élevage d'animaux de boucherie, lesquels ont un rendement protéique nettement inférieur et une consommation d'eau nettement plus élevée (figures 65 et 66).

En remplaçant progressivement et partiellement les protéines animales issues des bovins par des protéines issues de spiruline, on obtiendrait une baisse conséquente de l'émission de méthane.

En effet, en raison de la fermentation entérique particulière aux ruminants, les bovins sont les principaux responsables du rejet de ce gaz dans l'atmosphère. Une culture de la spiruline produit 50 tonnes de protéines à l'hectare (contre 160 kg pour le bœuf) et elle assure en parallèle une absorption de 25 tonnes de carbone à l'hectare [178].

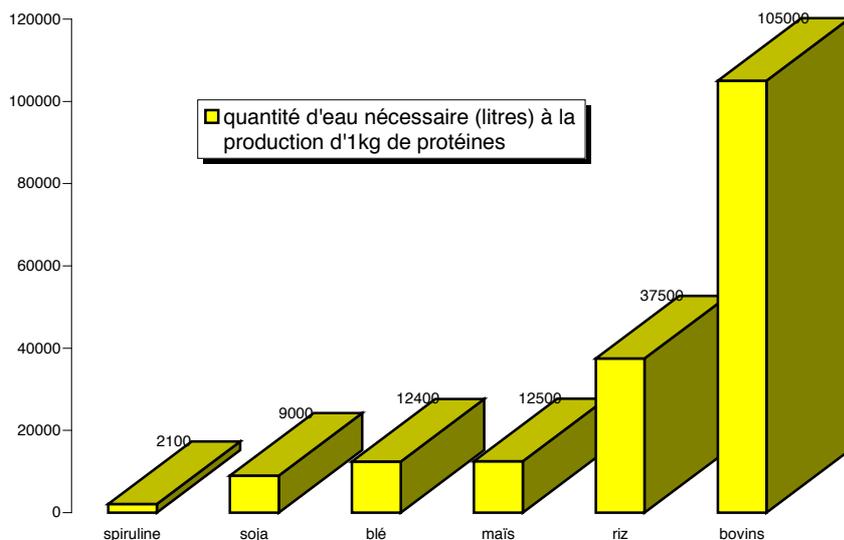


Figure 65 : Histogramme en trois dimensions mettant en évidence la quantité d'eau nécessaire à la production d'un kilogramme de protéines, pour divers nutriments habituellement exploités pour leur richesse en protéines [181].

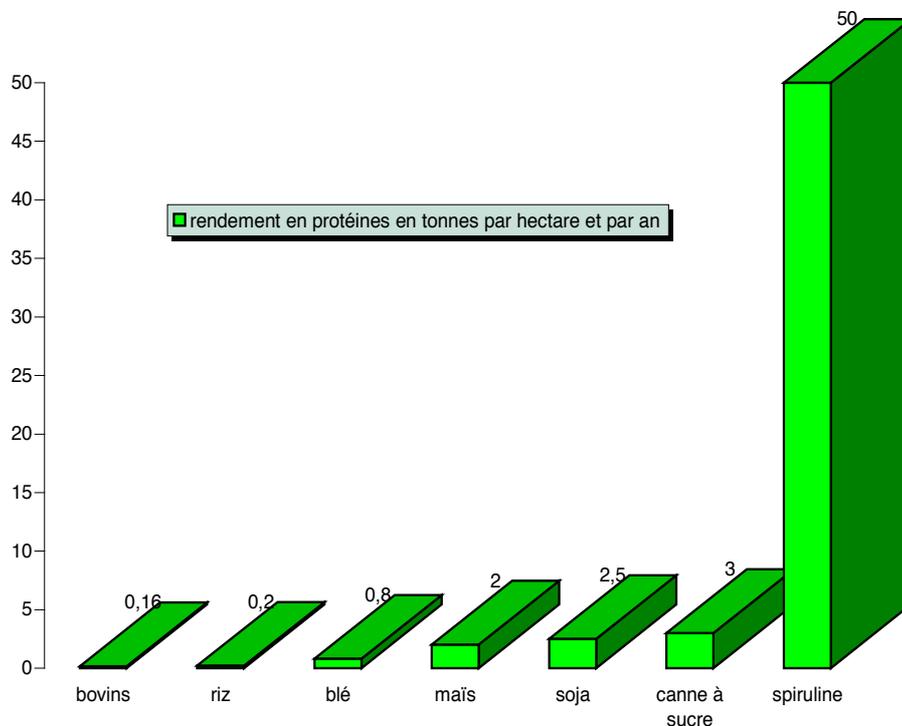


Figure 66 : Histogramme en trois dimensions mettant en évidence le rendement de production de protéines en tonnes par hectare et par an, pour diverses sources de protéines [181].

En ce qui concerne la possibilité de recyclage de certains déchets, la spiruline (et certaines micro-algues) a été utilisée dans le passé par Ripley Fox. La spiruline étant capable d'utiliser, pour sa croissance, les déjections des élevages porcins ou aviaires (sources de nitrates et de phosphates à l'origine de phénomènes d'eutrophisation des eaux), ce scientifique a mis en place, dès le début des années 80, le système de cultures intégrées villageoises. Installés dans certains pays (Madagascar, Inde, Chine, Vietnam, Sénégal, Togo), le but était de réduire les coûts de culture. L'idée reposait sur la participation directe de l'homme dans le cycle de la spiruline, par le biais du recyclage des déjections humaines ; celles-ci étaient récupérées et transférées dans les bassins de culture de spiruline. L'engrais fourni permettait sa croissance et la production de méthane (gaz de fermentation) [5].

Le procédé était adapté à la disponibilité des matières premières et aux habitudes et tabous culturels de chaque pays. En pratique, la réticence des populations des deux derniers pays cités a entraîné l'échec du projet.

C'est en Inde que la première expérimentation a eu lieu, dans le petit village de Karla, au centre du pays. La construction, terminée en 1984, fonctionne encore actuellement. Il comprend des sanitaires surélevés d'où les effluents vont, par gravitation, dans le digesteur (cuve de fermentation en anaérobie), dont l'effluent riche en azote et en sels minéraux, sert de nourriture à la spiruline, après fermentation.

Par contre au Sénégal, à Ronkh, le désintéressement des autorités villageoises ont fait que le projet a été stoppé.

Au nord Togo, dans le village de Farendé, le projet lancé en 1983 a connu aussi des difficultés d'adaptation. Un gazomètre devait recueillir le biogaz produit par le digesteur : le gaz carbonique était recyclé pour optimiser la croissance de la spiruline tandis que le méthane servait à la stérilisation des instruments chirurgicaux.

1.4.2 Baisse de la consommation en eau dans le domaine agroalimentaire

Sur Terre, 97,5 % de l'eau est salée. L'eau douce ne constitue donc qu'environ 2,5 % du total de l'eau ; or, plus des deux tiers sont concentrés dans les glaciers et la couverture neigeuse, et environ un tiers gît dans les nappes souterraines, plus ou moins accessibles. Par conséquent, il reste seulement 0,1 % d'eau douce facilement disponible à la surface des terres [182].

Au fil des décennies, l'eau douce est devenue une denrée très précieuse car les réserves s'amenuisent dangereusement. Il est urgent de l'économiser et surtout de ne pas la gaspiller car elle est indispensable à la vie sur Terre.

Comme le montre la figure 83, la culture de la spiruline consomme nettement moins d'eau que d'autres cultures ou que l'élevage de bétail, rapporté à la production d'une même quantité de protéines. Sans compter qu'à elle seule, la spiruline constitue un complément alimentaire complet.

Dans la perspective d'une limitation de la consommation d'eau douce, certains experts en spiruline ont déjà commencé à étudier des cultures utilisant l'eau de mer.

L'étude menée à partir de mai 2001 jusqu'à février 2004 par Tsarahevitra Jarisoa (Institut des Sciences Marines de Madagascar), Loïc Charpy (Institut de Recherche pour le Développement, Marseille) et Nardo Vicente (Institut Océanographique Paul Ricard, sur l'île des Embiez) permet d'apporter quelques éléments de réponse [183] :

- En milieu marin non traité, *S. platensis* est capable de pousser mais les biomasses obtenues sont inférieures à celles obtenues après un traitement de l'eau de mer.

L'eau de mer possède un pH autour de 8 (limite inférieure requise pour le développement de la spiruline), des traces de phosphore, azote, fer, et des quantités élevées de calcium (400 mg/l) et magnésium (1 200 mg/l), gênant la croissance de la cyanobactérie. Un traitement de cette eau par du carbonate de soude permet de précipiter une certaine quantité de calcium et magnésium.

Ensuite, on enrichit l'eau traitée en phosphore, azote, fer. Cette opération (traitement + enrichissement) permet un meilleur rendement de production mais il augmente le coût de réalisation d'une culture.

- L'analyse qualitative et quantitative n'a pas retrouvé de différences significatives avec l'analyse d'une même souche cultivée à partir d'eau douce.

Les études doivent être poursuivies en cherchant les solutions permettant d'optimiser les rendements tout en minimisant les coûts de production. Par exemple, si on arrivait à prouver la faisabilité d'une culture dans de l'eau de mer non traitée mais enrichie, ces coûts seraient nettement abaissés.

1.5 Recherche spatiale

L'un des sujets d'étude des programmes d'exploration spatiale concerne la création, le développement et l'amélioration des technologies mises en jeu dans les systèmes de soutien de vie pour les missions habitées. Un programme de recherche, du nom de projet MELiSSA (Micro Ecological Life Support System Alternative, ce qui signifie en français : option micro-écologique pour un système de support-vie), a débuté en 1989 [184] ; il est mené conjointement par la NASA (National Aeronautics and Space Administration) et l'ASE (Agence Spatiale Européenne). A l'heure actuelle, une dizaine d'équipes dans toute l'Europe et au Canada travaillent dessus.

Ce projet exploite la capacité de certains microorganismes à traiter les déchets et à régénérer l'atmosphère, dans le cadre d'écosystèmes clos artificiels.

Or, parmi toutes les espèces de microorganismes alimentaires existantes sur Terre, la spiruline est la seule à avoir été retenue par les scientifiques afin d'être cultivée dans des stations orbitales, dans le cadre de voyages de longue durée ou à longue distance.

Pour des missions habitées courtes ou en orbites proches de la Terre, il est possible d'embarquer les ressources nécessaires à la survie de l'équipage ou de les ravitailler en cours de mission : l'oxygène et la nourriture sont produits sur Terre et stockés à bord.

Les déchets produits pendant la mission (CO₂, urine) sont stockés après traitement physico-chimique. Mais, avec la perspective future de missions habitées de longue durée (missions sur la planète Mars), ces solutions ne sont plus envisageables. En effet, pour des raisons de volume et de masse, et donc de coûts, il n'est pas question d'exporter depuis la Terre, la totalité de l'oxygène, de l'eau et des aliments nécessaires à un très long séjour de plusieurs cosmonautes. De plus, les capacités de recyclage des systèmes physico-chimiques étant limitées, il faut trouver une solution qui permette à la fois :

- le recyclage de l'atmosphère
- le traitement des déchets
- le traitement et le recyclage de l'eau
- la production de nourriture nécessaire à l'équipage.

Il est bien entendu que tout ceci doit se faire dans un espace réduit, sans constituer de danger pour les êtres humains.

La solution trouvée est celle d'un écosystème artificiel fermé composé de cinq compartiments formant une boucle de recyclage [185] :

- le premier accueille l'ensemble des déchets organiques alimentaires, fécaux, papiers et eau produits par les membres de l'équipage ;
- le deuxième compartiment contient des bactéries thermophiles qui transforment les déchets solides et liquides en dioxyde de carbone, acides gras volatils et ammoniacque ;
- le troisième est inoculé par des bactéries nitrifiantes (photohétérotrophes) qui transforment les acides gras volatils en biomasse consommable et l'ammoniacque en nitrates (source d'azote assimilable pour la photosynthèse) ;
- le quatrième compartiment renferme la spiruline (photoautotrophe) ; elle se sert du CO₂, de l'eau et des minéraux précédemment formés pour sa croissance. En même temps, elle réalise une régénération rapide de l'atmosphère en oxygène, avec un bon rendement. La biomasse de spiruline produite constitue une excellente source de protéines pour les cosmonautes ;
- le dernier compartiment sert au développement de la culture de plantes supérieures utilisées pour équilibrer la ration alimentaire de l'équipage.

Etant donné la difficulté technologique pour développer un tel système et s'assurer qu'il soit fiable, le projet n'est encore pas abouti. Des essais de culture de spiruline en apesanteur sont en cours.

2. Tour d'horizon des éventuelles propriétés thérapeutiques de la spiruline, d'après les résultats des recherches cliniques menées et publiées

Depuis une trentaine d'années, de nombreuses études sont menées sur la spiruline, afin d'apporter des preuves de certains effets thérapeutiques soupçonnés car observés chez les consommateurs réguliers.

Certaines études ont été réalisées *in vitro*, d'autres *in vivo*, chez certaines espèces animales ou chez l'Homme. Le travail qui suit met en évidence les principaux axes de recherche et expose quelques études de référence, publiées dans diverses revues scientifiques internationales.

2.1. Activité antioxydante et antiradicalaire

Les mécanismes du vieillissement cellulaire et de la cancérisation sont de mieux en mieux connus, et la communauté scientifique s'accorde pour dire que le vieillissement cellulaire et certains cancers sont liés à l'effet oxydatif des radicaux libres ; ceux-ci font des ravages en altérant l'ADN nucléaire et les structures internes de la mitochondrie.

L'intérêt des antioxydants réside dans leur effet neutralisant sur les radicaux libres, avant que ceux-ci ne commettent des dégâts irréversibles, c'est-à-dire immédiatement au moment de leur formation au cours du métabolisme cellulaire.

La spiruline étant particulièrement riche en antioxydants puissants comme le β -carotène, la vitamine E, le zinc, le sélénium, la superoxyde dismutase, il est logique qu'elle ait des propriétés antioxydantes et antiradicalaires.

Mais des études suggèrent que d'autres mécanismes seraient impliqués dans la lutte contre le cancer et dans le domaine de la radioprotection.

Une des premières études publiées relate les recherches menées par Manoj et al.[186]. Ces scientifiques ont remarqué que l'extrait alcoolique de spiruline empêchait de manière plus significative la peroxydation des lipides, par rapport aux antioxydants chimiques : inhibition de 65 % contre 35 % avec l' α -tocophérol, 45 % avec le butylhydroxyanisol et 48 % avec le β -carotène. L'extrait aqueux de spiruline a également montré un effet antioxydant plus puissant (76 %) que l'acide gallique (54 %) et l'acide chlorogénique (56 %). Un aspect intéressant de leurs résultats est que l'extrait aqueux avait une activité antioxydante significative même après l'enlèvement des polyphénols.

Dans une autre étude, par Zhi-gang et al. [187], les effets antioxydants de deux fractions d'un extrait d'eau chaude de spiruline ont été étudiés en utilisant trois systèmes qui produisaient des radicaux superoxyde ($O_2\bullet$), lipidiques et hydroxyle ($OH\bullet$). Les deux fractions ont montré la capacité significative à débarrasser les radicaux hydroxyles (radicaux les plus fortement réactifs de l'oxygène), sans aucun effet sur les radicaux superoxyde. Une fraction a permis un nettoyage significatif des radicaux lipidiques, même à faible concentration.

Dans une autre étude menée par Miranda et al. [188], l'activité antioxydante d'un extrait méthanolique de *Spirulina maxima* a été déterminée *in vitro* et *in vivo*. L'activité antioxydante *in vitro* a été testée sur un homogénat de cerveau de rat incubé à 37°C, avec et sans l'extrait de spiruline.

Les résultats ont montré que la peroxydation de cet homogénat a été inhibée à presque 95 % en présence de 0,5 mg d'extrait méthanolique. La concentration de l'extrait méthanolique capable de réduire de 50 % la peroxydation (IC50) a été évaluée à seulement 180 µg/ml.

La capacité antioxydante a aussi été évaluée *in vivo*, dans le plasma et le foie d'animaux recevant une dose quotidienne de 5 mg d'extrait méthanolique de spiruline, pendant 2 et 7 semaines. L'activité antioxydante du plasma a été mesurée dans un homogénat de cerveau incubé pendant une heure à 37°C. La production d'éléments oxydés dans le foie après deux heures d'incubation a été évaluée par le biais du taux de substances réagissant avec l'acide thiobarbiturique (= TBARS, marqueurs de lipoperoxydation), dans le groupe expérimental et dans le groupe témoin. Elle s'est révélée être égale à 97 % et 71 % pour le groupe expérimental, contre 74 % et 54 % pour le groupe témoin, après respectivement 2 et 7 semaines. Cet effet antioxydant a été attribué au β-carotène, à l'α-tocophérol et aux composés phénoliques, lesquels agissent individuellement et/ou en synergie.

Plusieurs études sur *Spirulina platensis* ayant déjà mis en évidence des propriétés antiradicalaire (radicaux hydroxyle et peroxy) et inhibitrice de la peroxydation des lipides microsomaux, une étude a été menée dans le but de déterminer à quel(s) composant(s) pouvaient être attribués ces effets. La phycocyanine de *S. platensis* a donc été extraite, purifiée et caractérisée. Les chercheurs ont étudié l'activité antioxydante des différentes fractions obtenues tout au long de son procédé de purification, par le biais de l'évaluation de son activité antiradicalaire vis à vis des radicaux hydroxyles. Ils ont pu observer qu'une augmentation du contenu en phycocyanine était positivement corrélée à une augmentation de l'activité antioxydante des différentes fractions. Par conséquent, la phycocyanine semble être le composant en grande partie responsable de l'activité antioxydante de la spiruline [189].

L'activité antiradicalaire de la phycocyanine a été comparée aux activités de 2 substances de référence utilisées dans le domaine agroalimentaire : le tocophérol et le butylhydroxyanisol (BHA). La figure 67 montre l'activité antiradicalaire de l'extrait liquide de Spiruline (Spirulysat®) titré en phycocyanine par rapport à ces deux produits [190]. On peut constater que l'extrait de spiruline titré en phycocyanine a une activité antiradicalaire supérieure à celles des deux autres substances de référence.

activité anti-radicalaire

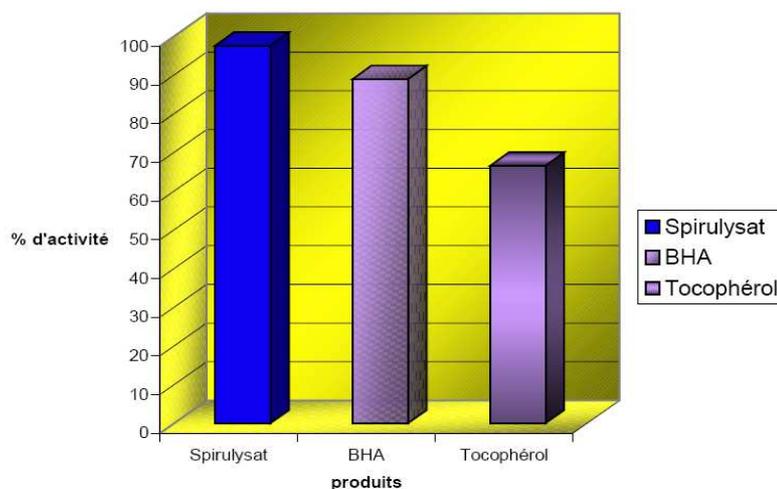


Figure 67 : Histogramme comparant l'activité antiradicalaire du Spirulysat® par rapport à celle du butylhydroxyanisol et du tocophérol.
© ALPHA BIOTECH.

Une étude menée par Romay [191] rapporte que la phycocyanine a empêché l'hémolyse d'érythrocytes induite par le 2,2'-azobis dihydroxychloride (AAPH), générateur de radicaux libres peroxy. Cette inhibition s'est révélée aussi efficace que celle issue de l'activité du Trolox® ou de l'acide ascorbique, puissants antioxydants. En se basant sur les valeurs de l'IC 50 (concentration de l'additif permettant une inhibition de 50 % de la peroxydation), la phycocyanine s'est avérée être un antioxydant 16 fois plus efficace que le Trolox® et environ 20 fois plus efficace que l'acide ascorbique.

Ces résultats ont été confirmés lors d'une étude ultérieure [192], laquelle a prouvé que l'activité antioxydante de la phycocyanobiline (un composant de phycocyanine) était plus puissante que celle de l' α -tocophérol, l'acide caféique et la zéaxanthine. Dans cette étude *in vitro*, l'effet antioxydant de la phycocyanobiline était évalué par le biais de l'oxydation du linoléate méthylique, induite par le AAPH et dirigée sur des liposomes de phosphatidylcholine. La phycocyanobiline a été distribuée en dehors des liposomes pour éliminer les radicaux du AAPH et pour éviter l'initialisation des réactions radicalaires en chaîne. Cette étude a également montré que la phycocyanine issue de la spiruline séchée par la méthode du "spray drying", possédait une activité antioxydante semblable à celle de la phycocyanine extraite de spiruline fraîche. Les résultats suggèrent que l'activité antioxydante de la phycocyanine serait attribuable à la phycocyanobiline, groupement prosthétique de la phycocyanine, puisque la partie protéique se serait dénaturée sous l'action du séchage.

Du fait que la phycocyanobiline semble responsable de la majorité de l'effet antioxydant de la phycocyanine, il serait intéressant de l'extraire de la spiruline dans le but de la commercialiser, afin d'utiliser cette propriété chez l'Homme.

Une étude publiée en 2001 [193], avait pour objectif d'observer l'effet antiradicalaire de la phycocyanine et de son chromophore, la phycocyanobiline, vis à vis du peroxyde d'azote (ONOO⁻). Cet anion, produit de la réaction *in vivo* de l'oxyde nitrique avec le superoxyde, est un oxydant puissant et polyvalent capable de s'attaquer à un large éventail de molécules biologiques. Il peut notamment réagir avec l'ADN, les protéines et les lipides à l'état physiologique, provoquant des dommages cellulaires importants ; sa réaction avec l'ADN provoque des lésions des bases nucléiques. Les résultats ont montré que ces deux composés de la spiruline ont permis une élimination efficace de l'anion peroxyde d'azote.

Cette étude a permis de montrer que la phycocyanobiline a inhibé significativement et de façon dose dépendante, les cassures dans un brin monocaténaire issu d'un plasmide d'ADN super-enroulé, provoquées par ONOO⁻. La valeur IC 50 obtenue (concentration permettant l'inhibition de 50 % de ces effets) était égale à $2,9 \pm 0,6$ µmol/l.

L'action antiradicalaire propre à chacun des deux composés a été quantifiée, en mesurant la cinétique de destruction des protéines par la technique de décoloration du rouge de pyrogallol. La proportion relative antioxydante et la valeur de l'IC 50 indiquent clairement que la phycocyanine est plus efficace que la phycocyanobiline dans ce rôle antiradicalaire.

Ces résultats suggèrent que la phycocyanine a la capacité d'inhiber les effets biologiques délétères provoqués par ONOO⁻ ; si cet effet était confirmé par d'autres études, la phycocyanine pourrait être utilisée comme agent thérapeutique antiradicalaire.

2.2. Effets sur le système immunitaire

Voici d'abord un bref rappel concernant le fonctionnement de notre système immunitaire, de façon à mieux comprendre ensuite l'impact de la spiruline.

L'immunité est une fonction physiologique permettant aux êtres vivants de développer des mécanismes de défense. Le système immunitaire constitue pour cela un ensemble complexe et coordonné de molécules, cellules, tissus et organes capables de reconnaître et tolérer le "soi", tout en reconnaissant et rejetant le "non soi" : substances étrangères, agents infectieux (bactéries, virus, champignons, parasites) auxquels il est exposé, propres constituants altérés (cellules tumorales par exemple) [194].

Ce système comprend ainsi :

- les **organes lymphoïdes centraux** (thymus et moelle osseuse) et **périphériques** (rate, ganglions lymphatiques, tissu lymphoïde annexé aux muqueuses) ;
- les **cellules de l'immunité** : lymphocytes B et T selon leur origine, lesquels se différencient en sous-populations lymphocytaires, avec des protéines membranaires CD caractéristiques. Il y a aussi les cellules naturellement tueuses (cellules NK) et les cellules présentatrices d'antigènes (monocytes, macrophages, cellules dendritiques...) ;

- les **molécules du système immunitaire** : anticorps, système du complément, cytokines (interleukines, interférons, facteurs de nécrose des tumeurs, facteurs de croissance hématopoïétiques, facteur de croissance des tumeurs) et molécules d'adhésion (sélectines, intégrines).

Des mécanismes de défense non spécifiques (barrières naturelles, cellules phagocytaires...) et spécifiques (lymphocytes et anticorps ciblant un antigène précis) se complètent pour assurer une réponse immunitaire adaptée.

Il faut aussi distinguer les réactions immunitaires primaires et secondaires. La prolifération sélective de lymphocytes menant à la formation de clones de cellules effectrices contre un antigène constitue la réponse primaire. Entre l'exposition à l'antigène et la production maximale de cellules effectrices, il se passe un délai de 5 à 10 jours (temps nécessaire à la différenciation des lymphocytes activés). Lorsque l'organisme rencontre le même antigène quelque temps plus tard, la réaction se produit plus vite (3 à 5 jours) et plus longtemps : c'est la réaction immunitaire secondaire ; elle résulte de la mémoire immunitaire, laquelle repose sur les cellules mémoires élaborées en même temps que les lymphocytes effecteurs à vie courte. Au cours de la réponse primaire, les cellules mémoires ne sont pas actives mais elles survivent plus longtemps et prolifèrent rapidement lors d'une deuxième exposition. La réaction immunitaire secondaire donne naissance à un nouveau clone de cellules mémoires et de nouveaux lymphocytes effecteurs.

La réponse immunitaire comporte donc la reconnaissance et la présentation de l'antigène, ainsi que la stimulation, la multiplication et la différenciation des deux types de lymphocytes.

Les dérèglements du système immunitaire peuvent être à l'origine de diverses manifestations pathologiques : états d'hypersensibilité (ou allergies), maladies auto-immunes ou déficits immunitaires responsables d'infections ou de cancers.

Toutes les études réalisées à ce jour sur les animaux (souris, rats, hamsters, poulets, dindes, chats et poissons) ainsi que les constats émanant de consommateurs réguliers de spiruline, vont dans le même sens : la spiruline agit positivement sur le système immunitaire.

Evidemment, connaissant sa composition qualitative et quantitative en micronutriments, ces résultats n'ont rien d'étonnant. Certaines vitamines du groupe B, les molécules antioxydantes (β -carotène, vitamine E, zinc, sélénium) et l'acide γ -linoléique qui entrent dans sa composition ont déjà prouvé individuellement leurs effets stimulants sur le système immunitaire. Il est alors logique que l'association de ces molécules soit synergique.

Mais, le plus intéressant est que cet effet "dopant" du système immunitaire reposerait aussi sur la présence de molécules complexes, polysaccharidiques et polypeptidiques, dont les effets immunostimulants sont étudiés depuis le milieu des années 90.

2.2.1. Renforcement du système immunitaire chez différentes espèces animales

Suite à des études menées *in vitro* ou *in vivo* sur des souris, hamsters, poulets, dindes, chats et poissons, les chercheurs ont constaté que la spiruline améliorait, de façon constante, l'activité du système immunitaire. Voici quelques précisions concernant la façon dont les études ont été menées (pour évaluer leur pertinence) et les résultats obtenus.

- ❑ Augmentation de la fonction phagocytaire des macrophages de chat [195]

Des macrophages obtenus après un lavement des alvéoles de bronches de chats ont été isolés et cultivés sur des plaques de verre. Les macrophages ont ensuite été exposés à un extrait hydrosoluble de *Spirulina platensis*, à des concentrations comprises entre 0 et 60 µg/ml, pendant 2 heures. L'exposition à cet extrait n'a pas causé de toxicité significative sur les macrophages par rapport au groupe témoin (macrophages non traités). Les cultures en monocouche, de macrophages traitées et celles servant de témoin, ont été incubées avec des globules rouges de mouton ainsi qu'avec *E. Coli* viable. Après cette incubation, il a été constaté que le pourcentage de macrophages phagocytaires pour ces deux antigènes particuliers avait respectivement doublé et augmenté de plus de 10 %, dans les cultures traitées avec des concentrations variables d'extrait de spiruline. Cependant, les chercheurs ont remarqué que le nombre de particules internalisées par les macrophages phagocytaires ne différait pas entre le groupe témoin et le groupe traité. Les données de l'étude montrant que l'extrait de *Spirulina platensis* augmente la fonction phagocytaire des macrophages, cela laisse penser qu'une supplémentation en spiruline pourrait augmenter la capacité de résistance aux maladies chez les chats.

- ❑ Stimulation des macrophages de poulets après une exposition *in vitro* à un extrait de spiruline [196]

Le but de cette étude consistait à mettre en évidence l'influence de l'exposition de macrophages de poulets à un extrait de *Spirulina platensis*. Des cultures en monocouches de macrophages issus d'un exsudat abdominal de poulet ont été mises en contact avec un extrait de spiruline pendant une à seize heures ; la concentration cet extrait variait de 10 à 40 µg/ml.

Les résultats obtenus ont montré une prolifération accrue et une meilleure efficacité phagocytaire (vacuolisation augmentée) des macrophages, avec une cytotoxicité minime. Le pourcentage de macrophages phagocytaires actifs sur les globules rouges non opsonisés de mouton et le nombre moyen de ces globules rouges internalisés s'est révélé significativement plus élevé dans le groupe de macrophages ayant été en contact avec de la spiruline, par rapport au groupe témoin.

En outre, les cultures de macrophages exposées à la spiruline ont produit, dans le surnageant, un facteur capable de détruire les cellules tumorales, dont l'activité était comparable à celle du produit issu des macrophages, suite à une exposition au lipopolysaccharide.

Ces résultats suggèrent que l'exposition *in vitro* à l'extrait de spiruline augmente la fonction effectrice sélective des cellules du système immunitaire du poulet.

□ Augmentation du potentiel immunitaire chez les poulets [197] [198]

Plusieurs études menées en parallèle par différents chercheurs ont mis en évidence l'effet favorable de la spiruline sur le système immunitaire des poulets.

Des poulets *Leghorn* blancs (= poulets à croissance lente) et des poussins destinés à la rôtisserie ont été nourris jusqu'à l'âge de 7 semaines et 3 semaines respectivement, avec une alimentation enrichie en spiruline à des concentrations variables (0 = lots témoins, 10, 100, 1 000 ou 10 000 ppm). Dans chaque lot, les poussins avaient un poids corporel comparable au début de l'étude. Les chercheurs ont observé une augmentation significative ($p \leq 0,05$) de poids de la bourse de Fabricius (équivalent du thymus chez l'Homme) et de la rate, uniquement dans le lot des poussins supplémentés en spiruline. Ils n'ont observé aucune différence quant au titre des anticorps dirigés contre les globules rouges de moutons pendant la réponse primaire.

D'autre part, le pourcentage de macrophages phagocytaires et la réponse secondaire par les anticorps se sont révélés meilleurs chez les poulets et poussins supplémentés en spiruline, par rapport aux lots témoins ; les résultats ont été fonction de la dose de spiruline reçue. Ainsi, chez les poulets *Leghorn* ayant reçu 10 000 ppm de spiruline, le titre de ces anticorps (6,8 Log₂) s'est révélé plus élevé par rapport à ceux qui n'ont pas reçu de spiruline (5,5 Log₂). Dans le groupe des poussins, les chercheurs ont observé un titre d'IgG supérieur d'une unité logarithmique chez ceux ayant reçu 10 000 ppm, par rapport à celui du lot témoin.

La supplémentation en spiruline (10 000 ppm) a aussi permis de multiplier par 2 l'activité des cellules NK, par rapport à celle des groupes témoins.

De plus, les poussins et poulets ayant reçu entre 1 000 et 10 000 ppm de spiruline ont développé une réponse lymphoproliférative (à lymphocytes T) plus puissante que les témoins, suite à l'injection d'un antigène (phytohémataglutinine) provoquant une hypersensibilité cutanée à basophiles. Cette réponse a été évaluée en comparant la mesure de l'épaisseur de la membrane interdigitée avant et après l'injection.

Les chercheurs ont aussi remarqué que les poulets nourris avec 1 000 ppm ou plus de spiruline ont significativement éliminé plus d'*E Coli* de la circulation (30 à 40 minutes après l'inoculation intraveineuse), et diminué le nombre de *Staphylococcus aureus* dans la rate (80 minutes après inoculation).

Ces études montrent que la supplémentation en spiruline, à cette dose, active plusieurs fonctions immunitaires, humorales et à médiation cellulaire, avec pour conséquence une augmentation du potentiel de résistance à la maladie chez les poulets.

❑ Spiruline et inhibition des manifestations anaphylactiques chez le rat [199][200]

Deux études ont été menées dans le but d'étudier, chez le rat, l'influence de la poudre de *Spirulina platensis* sur des réactions anaphylactiques induites par le composé 48/80.

Ce composé, également appelé "polyamine aromatique", est connu pour son effet histamino-libérateur ; on l'utilise en allergologie comme produit de référence dans les essais cutanés. Rappelons que l'histamine est un médiateur essentiel de la physiopathologie de multiples pathologies allergiques. Elle est synthétisée dans les cellules inflammatoires et immunocompétentes, dans les cellules pariétales de l'estomac et dans les neurones (réserve labile). Elle est libérée au niveau de la peau, de l'intestin, du foie et des bronches, lors du conflit antigène anticorps ou sous l'effet d'agents divers. Ses actions biologiques résultent de l'activation de quatre types de récepteurs ; elle entraîne une action vasodilatatrice puissante, une augmentation de la perméabilité capillaire, une bronchoconstriction, une activation des cellules inflammatoires, stimule les sécrétions gastriques et exerce selon les cas des effets inhibiteurs ou stimulants sur le système nerveux central ou périphérique [201].

A partir de ces études, les constats des chercheurs ont été les suivants :

- 100 % des chocs anaphylactiques provoqués ont été inhibés lorsque la poudre de spiruline était administrée avant le composé 48/80, aux doses de 0,5 et 1 mg/g de poids corporel ;
- réduction significative des taux d'histamine sériques chez les rats ayant reçu de la spiruline ;
- l'inhibition de la libération d'histamine et la diminution de la production de TNF- α , par les mastocytes de péritoine de rat activés par le composé 48/80 ou les IgE anti-dinitrophenyl, sont dépendantes de la dose de spiruline reçue.

Les auteurs ont alors émis l'hypothèse que la spiruline pourrait renfermer des molécules possédant des propriétés inhibitrices de la dégranulation mastocytaire chez le rat.

Des études chez l'Homme devraient être menées, de façon à évaluer si la prise régulière de spiruline pourrait, par exemple, permettre la diminution des manifestations clinico-biologiques liées aux réactions d'hypersensibilité immédiate.

- Effets immunomodulateurs d'une alimentation enrichie en spiruline chez les souris [202]

Les auteurs de cette étude ont été les premiers à publier des travaux détaillés sur les propriétés immunomodulatrices de *Spirulina platensis*, chez les souris dont le régime alimentaire en comportait.

Selon leurs résultats, les souris nourries avec de la spiruline ont développé un plus grand nombre d'anticorps en provenance de la rate, suite à une inoculation de globules rouges de moutons ; il s'agit d'une réponse immunitaire primaire contre ces cellules étrangères.

L'immunoglobuline G, anticorps produit lors d'une réponse immunitaire secondaire, n'a pratiquement pas vu sa production augmenter.

De plus, le pourcentage de cellules phagocytaires, dans les macrophages péritonéaux des souris ayant reçu de la spiruline, a significativement augmenté.

L'addition d'un extrait à l'eau chaude de spiruline à une culture *in vitro* de cellules de rate, a permis une prolifération significative de celles-ci, alors que cet ajout n'a pas eu d'effet sur la culture de cellules de thymus. L'extrait de spiruline a également augmenté de façon significative la production d'interleukine-1 (IL-1) par les macrophages péritonéaux des souris.

Il semble donc que l'addition de l'extrait de spiruline à une culture *in vitro* de rate et d'un surnageant de macrophages stimulés par cet extrait, s'est traduit par une augmentation de la production d'anticorps. Cet extrait de spiruline s'est montré capable d'augmenter la réponse immunitaire, plus particulièrement la réponse primaire, en stimulant la fonction phagocytaire des macrophages et la production d'IL-1.

Les résultats obtenus sont venus confirmer les études préliminaires menées par Liu et ses collaborateurs [203].

- Influence d'un régime alimentaire comportant *Spirulina platensis* sur les taux de différentes classes d'immunoglobulines sériques chez la souris [204]

Cette étude a été conduite dans le but de déterminer l'influence de la phycocyanine contenue dans la spiruline, sur les réponses immunitaires muqueuses et systémiques, ainsi que sur l'inflammation liée à une allergie.

Pour induire la production d'anticorps spécifiques dans les tissus lymphoïdes périphériques tels que les plaques de Peyer et les ganglions lymphatiques mésentériques, des microsphères biodégradables en poly (DL-lactide-co-glycolide) ont été utilisées ; l'ovalbumine, utilisée comme antigène modèle, a été préalablement incorporée dans ces microsphères. A noter que ces systèmes microparticulaires, renfermant un antigène donné, sont utilisés comme agent immunitaire dans la vaccination par voie orale.

Deux semaines après le début de l'ingestion de phycocyanine, les souris ont été immunisées avec une solution aqueuse d'ovalbumine. Puis, une semaine après l'immunisation primaire, elles ont été soumises à l'immunisation orale par le biais des microsphères contenant de l'ovalbumine, deux fois par semaine. Les taux d'anticorps IgA, IgE et IgG1 ont été déterminés par la méthode ELISA (enzyme-linked immunosorbent assay).

Les résultats obtenus ont montré que les souris ayant reçu le traitement par phycocyanine pendant 6 semaines, ont produit un nombre important d'anticorps d'IgA dans les plaques de Peyer, les ganglions lymphatiques mésentériques, la muqueuse intestinale et les cellules de rate. Les taux sériques des anticorps antigène-spécifique IgG1 et IgE ont été ramenés à zéro, après à une administration de phycocyanine pendant une durée de 8 semaines. Cependant, il faut noter que l'inflammation du petit intestin a été réduite au bout de 6 semaines de phycocyanine, soit 2 semaines avant que le taux des anticorps IgG1 et IgE ne soient indétectables.

Ces résultats suggèrent que la phycocyanine serait capable de stimuler les fonctions du système immunitaire muqueux et de réduire l'inflammation allergique, en supprimant les anticorps antigène-spécifique IgE.

Ces fonctions, si elles étaient prouvées chez l'Homme, permettraient de renforcer l'organisme dans sa lutte face aux maladies infectieuses et aux manifestations inflammatoires consécutives à une allergie.

- ❑ Influence de *Spirulina platensis* sur le taux d'IgA dans la salive de l'Homme [205]

L'étude a été réalisée chez 127 sujets. Les résultats ont d'abord montré que le taux des IgA salivaires était significativement plus élevé chez les sujets consommant régulièrement de la spiruline depuis plus d'un an, comparativement à ceux qui en consomment depuis moins d'un an.

Les chercheurs à l'origine de cet essai ont ensuite réussi à mettre en évidence une corrélation positive entre le taux de ces anticorps et la quantité cumulée de spiruline consommée.

- ❑ Effets de la spiruline chez les patients atteints de rhinite allergique [206]

Le docteur Gershwin, de l'Université de Californie à Irvine, a annoncé en 2005 le résultat d'une étude menée sur 36 patients souffrant de rhinite allergique. L'essai randomisé a été mené en double aveugle versus placebo.

De cette étude, il ressort que l'ingestion quotidienne de 2 g de spiruline permettrait de réduire significativement le niveau de l'interleukine 4 (IL-4), laquelle est responsable de la production des Ig E, médiateurs des symptômes de la rhinite allergique. L'étude ayant été conduite chez un petit nombre de sujets, ces résultats sont à confirmer par des études à plus grande échelle.

Il est cependant intéressant de noter que l'étude a été sponsorisée par la ferme *Earthrise*, laquelle a choisit la stratégie de soutenir des travaux purement scientifiques sur l'intérêt de la spiruline. Bien que les moyens de ses chercheurs soient nettement plus limités que ceux des laboratoires pharmaceutiques, ils continuent leurs investigations.

2.2.2. Activité antivirale

Pour se répliquer, les virus doivent pénétrer dans une cellule qui les accepte, c'est-à-dire portant en surface des récepteurs s'accordant aux structures virales superficielles.

Une étude, conduite *in vitro*, a permis de mettre en évidence, grâce à des essais d'inhibition réalisés en microplaques, l'activité antivirale d'un extrait à l'eau chaude issu de *Spirulina maxima* [207]. Cette activité a été testée sur plusieurs virus. L'extrait de spiruline a empêché l'infection par le virus Herpès Simplex type 2 (HSV-2), le virus de la rage, le Cytomégalovirus et le virus Herpès Simplex type 1. Pour chacun de ces virus, les concentrations de l'extrait de spiruline ayant permis une inhibition effective de 50 % ont été respectivement de 0,069 – 0,103 – 0,142 et 0,333 mg/ml. Concernant Adénovirus, une concentration de 2 mg/ml en extrait de spiruline n'a engendrée qu'une inhibition effective de 20 % de l'infection. A cette même concentration, aucun effet antiviral n'a été observé vis-à-vis du Rotavirus SA-11 et vis-à-vis des virus responsables de la rougeole, de l'encéphalite de Van Bogaert, de la stomatite vésiculeuse et de la poliomyélite. L'activité antivirale la plus élevée a été constatée sur HSV-2.

L'étude a aussi montré que l'effet antiviral ne résultait pas d'un effet virucide ; l'infection herpétique a été inhibée au tout début du cycle viral, c'est-à-dire au stade d'adsorption et de pénétration du virus dans les cellules hôte.

De façon à isoler et identifier le composé de la spiruline présentant cette activité antivirale, différents extraits ont été fabriqués en utilisant plusieurs solvants de polarité différente.

La plus forte activité a été constatée avec un extrait méthanol-eau (3:1), ce qui laisse penser que l'effet est probablement lié à la forte polarité de cet extrait de spiruline.

Une autre étude a été conduite en 1998 par A. Belay et al [208], afin d'observer les effets de la spiruline vis à vis du virus de l'immunodéficience humaine de type 1 (VIH-1). Ces chercheurs ont mis en évidence que l'extrait hydrosoluble d'*Arthrospira platensis* était capable de freiner la réplication de ce virus dans des lymphocytes T humains, dans des cellules mononucléaires de sang périphérique et dans des cellules de Langerhans. Des concentrations de cet extrait de spiruline, comprises entre 0,3 et 1,2 µg/ml, ont permis une réduction de 50 % environ de la réplication virale dans les cellules mononucléaires (par comparaison avec des cellules non en contact avec l'extrait). Dans ces cellules, la concentration en extrait ayant permis une réduction de 50 % de la charge virale se situait entre 0,8 et 3,1 mg/ml.

D'autre part, l'équipe a constaté que l'extrait s'avérait capable d'inactiver directement l'infection par le VIH-1 lorsqu'il était préincubé avec le virus, avant l'addition de cellules T humaines.

Le fractionnement de l'extrait de spiruline utilisé pour les besoins de l'étude a montré que l'activité antivirale était attribuable à la fraction polysaccharidique. Ces résultats, s'ils étaient confirmés dans le futur par d'autres études *in vitro* plus poussées puis *in vivo* chez l'animal et chez l'homme, permettraient d'attribuer à la fraction polysaccharidique de la spiruline, un potentiel thérapeutique très intéressant et sans risque de toxicité.

Une équipe de chercheurs japonais a mené plusieurs études concernant l'activité antivirale d'un polysaccharide sulfaté isolé après extraction aqueuse de *Spirulina platensis* : le **calcium-spirulan** (Ca-SP). Ce polysaccharide se compose de rhamnose, ribose, mannose, fructose, galactose, xylose, glucose, acide glucuronique, acide galacturonique, sulfate et calcium.

Ils ont d'abord mis en évidence le fait que le Ca-SP était capable d'inhiber sélectivement la pénétration de certains virus enveloppés dans les cellules hôte : HSV-1, CMV, virus de la rougeole, virus des oreillons, virus influenza A et VIH-1 [209].

Ensuite, ils ont cherché à déterminer le rôle de l'ion calcium de la molécule Ca-SP dans l'activité antivirale, en utilisant des molécules de type sodium-spirulan (Na-SP) ou de type H-SP. Ils ont comparé l'effet de chaque molécule sur la formation du syncytium du virus HIV-1. Il en est ressorti que le sodium-spirulan présente un effet inhibiteur comparable au Ca-SP à des concentrations supérieures à 5 $\mu\text{g/ml}$ et une IC 50 de 10,5 $\mu\text{g/ml}$; par contre, il stimule la fusion cellulaire en dessous de 1 $\mu\text{g/ml}$. Quant au H-SP, il n'a pas présenté d'inhibition de la formation de syncytium, mais un effet stimulant sur la réplication virale en dessous de 5 $\mu\text{g/ml}$.

Par ailleurs, le Ca-SP désulfaté ne présente plus d'activité inhibitrice. Cela confirme le rôle important des ions sulfates dans l'activité inhibitrice. Néanmoins, le H-SP qui possède des groupements sulfates, ne présente pas d'activité. Il apparaît donc que la conformation moléculaire du Ca-SP (chélation du calcium avec les groupements sulfate) joue un rôle important dans l'activité antivirale [210].

Les chercheurs ont ensuite approfondi leurs recherches en comparant ces propriétés à celles d'un autre polysaccharide sulfaté, le dextrane sulfate (DS), contre deux types de virus : le virus HIV de type 1 (HIV-1) et le virus de l'herpès simplex type 1 (HSV-1). L'ensemble de leurs expériences ont été réalisées *in vitro* et *ex vivo* [211].

Une première expérience a consisté à comparer l'effet inhibiteur des deux molécules sur la réplication des virus HIV-1 et HSV-1 (cf. tableaux XIX et XX). La concentration nécessaire pour obtenir 50 % d'inhibition contre le virus HIV-1 (IC 50) est respectivement de 9,3 et 9,6 $\mu\text{g/ml}$ pour Ca-SP et DS. Les auteurs ont mis en évidence le fait que le calcium-spirulan intervient très certainement à un stade très précoce du phénomène de réplication du virus.

Par ailleurs, une deuxième expérience menée sur HIV-1 a montré que le Ca-SP inhibait totalement la formation du syncytium viral à des concentrations voisines de 25 $\mu\text{g/ml}$, alors que l'on n'obtenait pas de blocage total avec le dextrane sulfate, même à des concentrations supérieures à 100 $\mu\text{g/ml}$. Les valeurs de l'IC 50 sont respectivement de 7,3 et de 14,2 $\mu\text{g/ml}$ pour Ca-SP et DS. De plus, à de faibles concentrations, le DS stimule la fusion cellulaire, alors que le Ca-SP continue à l'inhiber [212].

Activité anti-HIV1		
	valeur de l'IC 50 lorsque le composé est absent au moment de l'infection	valeur de l'IC 50 lorsque le composé est présent au moment de l'infection
Calcium-spirulan	9,3 µg/ml	1,8 µg/ml
Dextrane sulfate	9,6 µg/ml	2,3 µg/ml

Activité anti-HSV1		
	valeur de l'IC 50 lorsque le composé est absent au moment de l'infection	valeur de l'IC 50 lorsque le composé est présent au moment de l'infection
Calcium-spirulan	9,7 µg/ml	0,85 µg/ml
Dextrane sulfate	173 µg/ml	0,92 µg/ml

Tableaux XIX (en haut) et XX : Comparaison de l'effet inhibiteur du calcium-spirulan et du dextrane sulfate sur la réplication virale de HIV-1 et HSV-1 [212].

© CEVA

L'ensemble de ces résultats suggère que le Ca-SP présenterait un potentiel antiviral à l'encontre de HIV-1 équivalent à celui du DS, mais avec une inhibition plus forte sur HSV-1.

Le Ca-SP inhiberait la réplication du virus en empêchant celui-ci de se lier à la cellule hôte, et par conséquent en inhibant la fusion cellulaire entre cette dernière et le virus. Le composé antiviral semble créer, en effet, une perturbation des interactions ioniques possibles entre les glycoprotéines membranaires du virus et les phospholipides présents sur la membrane de la cellule hôte.

D'autre part, d'un point de vue thérapeutique, il est essentiel qu'une molécule antivirale conserve sa biodisponibilité le plus longtemps possible dans le sang. Or, dans le contexte décrit ici, le temps de demi-vie du DS est beaucoup plus court que celui du Ca-SP : 30 minutes chez le lapin et moins de 30 minutes chez la souris, contre 150 minutes pour le Ca-SP chez ces deux espèces animales [212].

Les résultats de cette étude sont donc très prometteurs puisque le Ca-SP semble présenter toutes les propriétés nécessaires à un bon agent antiviral : temps de demi-vie élevé dans le sang, activité à de faibles concentrations sans risque de stimulation de la réplication virale. Il serait bien maintenant d'approfondir ces recherches en conduisant des études, toujours pertinentes, à long terme, sur de larges échantillons de population humaine.

Si ces effets prometteurs sont confirmés, il sera alors utile de mettre au point des procédés d'extraction du Ca-SP à partir de spiruline, procédés qui devront être compétitifs sur le plan commercial.

Très récemment, lors de la 4^{ème} conférence sur le VIH/SIDA à la Cité des Sciences et de l'Industrie, les résultats préliminaires d'une étude menée au Burkina ont été communiqués [213] ; voici les éléments importants :

L'objectif consistait à évaluer l'impact de la prise d'*Arthrospira platensis* sur l'état général et physique, le statut immunologique et l'état nutritionnel de personnes infectées par le VIH à Bobo-Dioulasso.

Au total, 192 patients (âgés de 20 ans et plus) confirmés VIH positifs ont été recrutés (après obtention de leur consentement éclairé) dans un essai randomisé en double aveugle, avec contrôle placebo. Ils ont été répartis en trois groupes selon leur nombre de lymphocytes CD4 :

- o Groupe 1 : 65 sujets (CD4 \leq 200/ml)
- o Groupe 2 : 68 sujets (200 < CD4 \leq 400/ml)
- o Groupe 3 : 59 sujets (CD4 > 400/ml)

Chaque patient a été suivi médicalement en parallèle, au rythme d'une fois par mois, pendant la durée de l'étude (12 mois). A noter que dans l'échantillon de l'étude, 84,9 % des sujets sont infectés par le VIH-1, 4,7 % le sont par le VIH-2 et 10,4 % sont infectés par ces deux virus.

Les résultats obtenus après les six premiers mois de suivi sont les suivants :

le nombre moyen de CD4 des patients prenant de la spiruline est passé de 143,88 à 185,5 dans le groupe 1 (p = 0,042) et de 280,97 à 284,53 dans le groupe 2 (p = 0,46). Concernant le groupe 3, la moyenne des CD4 a baissé de façon non significative, contrairement aux sujets placebo dont la moyenne des CD4 est passée de 546,6 à 338,1 (p = 0,01).

Sur le plan nutritionnel, la moyenne géométrique de l'IMC (Indice de Masse Corporelle) s'est améliorée de façon significative pour tous les sujets : l'IMC est passé d'une moyenne de 21,5 à 22 (p < 0,001).

La mesure de la charge virale est encore en cours d'analyse.

Bien que ces résultats soient préliminaires, on peut légitimement avancer que la prise quotidienne de spiruline semble avoir un impact positif sur la prise en charge clinique, biologique et nutritionnelle des patients infectés par le VIH.

Par ailleurs, comme le suggère l'étude ci-dessus, indépendamment de son rôle éventuel sur le virus responsable de l'infection VIH/SIDA, la spiruline aurait aussi un effet bénéfique sur le plan nutritionnel. Cet intérêt pourrait s'expliquer par sa composition nutritive et au vu de la physiopathologie de l'infection par le VIH. Ce virus a un tropisme particulier pour les lymphocytes T porteurs de la protéine de surface CD4.

Avec la progression de la maladie, l'affaiblissement des défenses immunitaires engendre, chez les sujets infectés, des infections plus ou moins graves et des cancers. De gros efforts de recherche ont permis la mise sur le marché de nouvelles molécules antivirales, plus efficaces et mieux tolérées, améliorant à la fois la survie et la qualité de vie des patients pouvant avoir accès à ces traitements coûteux.

Néanmoins, la dénutrition est un problème qui reste très fréquent lors de l'infection par le VIH. Or, les aspects nutritionnels chez les victimes de ce virus ont longtemps été ignorés, l'attention étant presque toujours centrée sur les médicaments. Il est bien établi maintenant que le virus du Sida exerce un effet dévastateur sur le bien-être nutritionnel des personnes infectées [214] : globalement,

- ✓ il réduit l'absorption de substances nutritives ;
- ✓ il bouleverse l'appétit et les métabolismes ;
- ✓ il détériore les muscles et les organes ;
- ✓ il rend le corps plus vulnérable aux agressions extérieures.

Lors de l'infection par le VIH, on constate très fréquemment un amaigrissement chez les sujets atteints. Celui-ci est lié [215] :

- à une augmentation de la dépense énergétique de repos (DER),
- et/ou à une diminution des prises alimentaires,
- et/ou à une majoration des pertes digestives.

L'**augmentation de la DER** est présente très précocement, même en l'absence de signe clinique. Elle représente un hyper métabolisme d'environ 11 à 15 %. Il se produit alors une compensation par une augmentation de la prise alimentaire. Les séropositifs ont donc des besoins nutritionnels supérieurs à la normale, particulièrement pour ce qui est des protéines (jusqu'à 50 % de plus) et de l'énergie (jusqu'à 15 %).

Lorsque d'autres facteurs apparaissent (anorexie, dysphagie, diarrhées par exemple), la balance énergétique se négative et la perte de poids peut être de 0,5 à 2 kg par mois, voire plus. Lors d'une infection secondaire à la maladie, la majoration de la DER est forte, atteignant 50 %, avec un catabolisme intense. La perte de poids peut alors atteindre plusieurs kg/semaine [215].

La **diminution de la prise alimentaire** est la principale cause de dénutrition chez ces patients. Elle peut être liée à :

- l'anorexie induite par la maladie ou ses complications. Une composante psychogène est fréquente, marquée par un état dépressif ;
- une candidose buccale et/ou œsophagienne, des ulcérations œsophagiennes, qui peuvent rendre l'alimentation douloureuse, voire impossible ;
- un état occlusif, lors du développement d'un lymphome digestif ou de sarcomes de Kaposi.

Concernant la **majoration des pertes digestives**, environ 50 % des malades sont confrontés à un problème de diarrhées, auxquelles peut s'ajouter une malabsorption.

Les causes peuvent être parasitaires (cryptosporidiose, microsporidiose), bactériennes (salmonellose, infections à *Clostridium difficile* ou à mycobactéries atypiques), virales (Cytomégalovirus, herpès virus et adénovirus), tumorales (lymphomes digestifs, sarcomes de Kaposi digestifs) [215].

Une prise en charge nutritionnelle est donc indispensable en complément du traitement médicamenteux [216]. Elle permet notamment d'obtenir :

- une amélioration de l'état général (reprise de forces, reprise de poids et de masse maigre, baisse de la fréquence des infections opportunistes) ;
- une diminution de la dépendance, une reprise des activités et un traitement possible à domicile ;
- une amélioration de l'état psychologique.

Certes, la prise en charge nutritionnelle a une meilleure efficacité (amélioration de l'état général et de la qualité de vie) lorsque les infections sont contrôlées ; son effet est plus modeste lors des poussées infectieuses.

La grande majorité des personnes infectées par le VIH vivent dans des pays en voie de développement ou dans des pays émergents dont les ressources, les médicaments et les services de santé sont rares. Pour ces personnes, une alimentation équilibrée est donc indispensable pour les aider à affronter la maladie.

En 2003, en collaboration avec l'OMS, la FAO a publié un manuel destiné aux personnes infectées par le VIH. Cet ouvrage met en lumière la relation existant entre l'infection et l'alimentation, et donne des conseils nutritionnels [217].

Plusieurs recherches ont déjà montré que l'apparition de la maladie pouvait être retardée dans le cas de séropositifs bien nourris ; elles ont aussi établi que des régimes alimentaires riches en protéines, en énergie et en micro-nutriments contribuaient à améliorer la résistance aux infections opportunistes chez les malades du Sida et donc à prolonger leur vie dans de meilleures conditions [216].

D'après ce qui a été décrit dans la première partie de cet exposé, la spiruline offre donc les qualités nutritives idéales pour être utilisée dans cette indication.

Grâce à son apport équilibré en micro-nutriments variés, une administration quotidienne de quelques grammes de spiruline permettrait de rompre le cercle vicieux dysfonctionnement immunitaire – infection VIH/SIDA – malnutrition (figure 68).

Ainsi, même si la spiruline ne se révèle pas comme le remède miracle et même si elle n'empêche pas que l'on meurt du sida, elle peut néanmoins protéger et renforcer le système immunitaire des individus. Leur organisme pourra alors lutter plus efficacement contre les ravages de la maladie et mieux supporter les traitements médicamenteux.

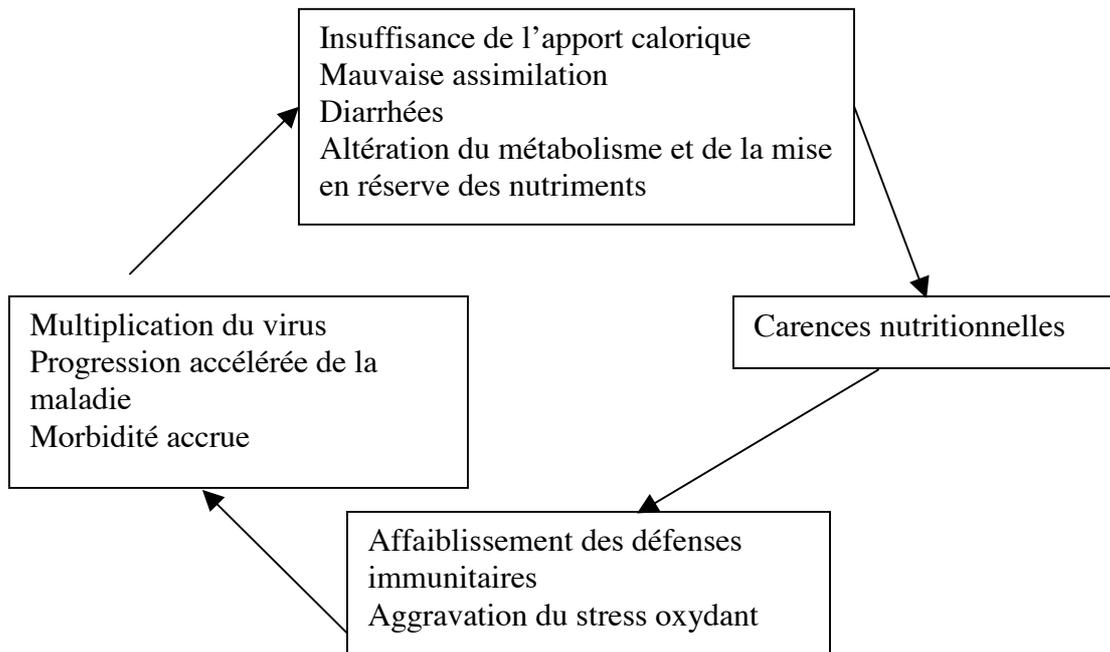


Figure 68 : Représentation du cercle vicieux entre malnutrition et infection par le VIH

2.2.3. Effets anticancéreux

Actuellement, peu d'études concernant le potentiel de la spiruline dans le domaine de la cancérologie humaine ont été publiées. Les résultats d'essais menés chez des hamsters, des souris ou *in vitro* sont un peu plus nombreux.

❑ Effet sur la prévention de la leucoplasie buccale [218]

Des chercheurs, membres du Centre Régional du Cancer au Kerala en Inde, ont évalué l'effet de l'administration de spiruline sur la prévention de la leucoplasie de la bouche, chez des sujets présentant déjà des lésions précancéreuses. L'étude a été menée sur 87 chiqueurs de tabac, ce comportement étant reconnu comme facteur de risque d'apparition de ce type de cancer.

Parmi l'échantillon retenu, 44 patients ont reçu 1g de spiruline par jour pendant 12 mois et 43 sujets ont reçu la même dose de placebo.

Les résultats ont montré une régression complète des lésions précancéreuses chez 20 sujets parmi les 44 ayant été supplémenté en spiruline (# 45,5 %) contre 3 sujets parmi les 43 du groupe témoin (# 7 %) [$p < 0,0001$]. En stratifiant les sujets selon leur type de leucoplasie, les chercheurs ont observé que la réponse à la spiruline était plus prononcée lorsque les lésions étaient homogènes ; en effet, une régression complète était constatée chez :

- 16 des 28 sujets présentant une forme homogène de leucoplasie
- 2 des 8 sujets présentant une érythroplasie
- 2 des 4 sujets présentant une leucoplasie verruqueuse
- Aucun des sujets présentant des lésions ulcérées et nodulaires.

De plus, dans l'année qui a suivi l'arrêt de la supplémentation en spiruline, 9 patients sur les 20 ayant connu une régression totale de leurs lésions (45 %), ont développé des lésions récurrentes.

Les résultats de cette étude sont intéressants et prometteurs car, dans les pays développés, la consommation du tabac est responsable d'une augmentation importante de l'incidence du cancer de la bouche et des poumons. Il serait donc important d'approfondir cet aspect potentiellement utile de la spiruline, par le biais de la réalisation d'études rigoureuses sur une large population humaine. Si cet effet de la spiruline était confirmé, il serait alors facile de l'utiliser comme agent thérapeutique, en l'incorporant dans le régime alimentaire quotidien des patients. Par ailleurs, sa bonne tolérance et son absence d'effets indésirables sont des atouts essentiels dans ce domaine car les molécules anticancéreuses posent souvent des problèmes de tolérance.

- Effets de la phycocyanine sur la croissance des cellules K562 de la leucémie humaine [219]

Dans cette étude, l'effet d'un extrait pur de phycocyanine a été évalué chez l'Homme, sur la croissance et la multiplication des cellules K 562 de la leucémie myéloïde chronique. Les résultats ont montré une diminution significative (49 %) de la prolifération de ces cellules lorsqu'elles sont traitées avec 50 $\mu\text{mol/l}$ de phycocyanine pendant 48 heures. D'autres études, utilisant la microscopie électronique ou à fluorescence, indiquent des aspects typiques d'apoptose, telles que la diminution du volume cellulaire, la turgescence de la membrane plasmique et la condensation de la chromatine du noyau. L'électrophorèse sur gel d'agarose de l'ADN des cellules traitées préalablement par la phycocyanine, montre que celui-ci a été dégradé en petits fragments caractéristiques de l'apoptose.

D'autre part, l'analyse, par cytométrie de flux, des cellules traitées avec 25 et 50 $\mu\text{mol/l}$ de phycocyanine pendant 48 heures indique que, respectivement 14,11 et 20,93 % des cellules sont en phase sub-G0/G1. Les chercheurs ont aussi constaté la libération du cytochrome dans le cytosol et le clivage de la poly(ADP)-ribose polymérase.

L'étude a également permis de mettre en évidence une down-régulation de Bcl-2 (protéine active à la surface des mitochondries et bloquant l'apoptose dans des conditions normales), mais sans aucun changement de Bax (protéine pro-apoptotique). Or, le rapport Bcl-2/Bax constitue un paramètre déterminant pour le sort des cellules. Ici, les chercheurs ont observé une diminution de ce rapport, ce qui est en faveur de l'apoptose.

En conclusion, la phycocyanine s'est avérée capable de favoriser, de façon dose dépendante, l'apoptose des cellules K562 par le biais de trois éléments : la libération du cytochrome C à partir des mitochondries, le clivage de la poly (ADP)-ribose polymérase par les capsases et la down-régulation de Bcl-2.

Voici quelques précisions permettant de mieux comprendre ce qui précède : afin de préserver l'intégrité du message génétique, la cellule a développé un ensemble de réponses spécifiques vis à vis du stress génotoxique ; par exemple, la poly (ADP)-ribosylation est un des mécanismes impliquant une modification post-traductionnelle immédiate induite par les cassures présentes dans l'ADN. La poly (ADP)-ribose polymérase qui catalyse cette réaction, détecte et signale les interruptions du squelette sucre-phosphate dans l'ADN, et participe activement à la réparation par excision de bases. Si l'ADN est trop endommagé, le clivage de l'enzyme par les caspases, survenant en même temps que celui d'autres enzymes de réparation et de protéines structurales nucléaires, empêche une réparation futile et assure l'irréversibilité du programme de mort cellulaire par apoptose [220].

□ Effet des polysaccharides de la spiruline sur les endonucléases [221]

Certaines formes communes du cancer sont le résultat de l'ADN cellulaire endommagé, provoquant ainsi une croissance cellulaire déchaînée. Des biologistes spécialisés en cytologie ont mis en évidence chez l'Homme, un système complexe d'enzymes spéciales appelées endonucléases, capables de réparer l'ADN chromosomique endommagé de façon à garder les cellules vivantes et saines. Lorsque ces enzymes sont désactivées sous l'effet de radiations ou de toxines, les erreurs dans l'ADN ne sont pas réparées et le cancer peut ainsi se répandre.

Le professeur Pang Qishen et son équipe de chercheurs chinois ont mené, en 1988, des essais *in vitro*, dans le but d'étudier l'effet des polysaccharides de la spiruline sur ce système des endonucléases. Il s'est avéré que les polysaccharides ont stimulé ce système, ce qui a permis d'améliorer l'activité enzymatique du noyau cellulaire et de faciliter la synthèse réparatrice de l'ADN.

D'autres études complémentaires seraient intéressantes pour confirmer cet effet, de façon à établir si les polysaccharides de la spiruline pourraient être proposés dans la prévention des processus de cancérisation.

- Effet du calcium-spirulan sur l'invasion tumorale et métastatique chez des souris [222]

Voici d'abord quelques rappels de cancérologie qui permettront de bien comprendre ensuite le mécanisme d'action du calcium-spirulan.

Dans un premier temps, dit pré-invasif, les cellules tumorales perdent les contacts avec les cellules voisines, mais leur prolifération et leur désorganisation restent limitées au compartiment épithélial d'origine, séparées du reste de l'organisme par une membrane basale, riche en collagène de type IV et en laminine.

Cette prolifération initiale est appelée carcinome *in situ*. Dans un second temps, les cellules cancéreuses franchissent la membrane basale, devenant carcinome micro-invasif puis invasif. Elles forment une masse tumorale, et peuvent envahir secondairement les vaisseaux lymphatiques et sanguins, aboutissant à la formation de métastases.

La **membrane basale** constitue le premier rempart contre l'invasion tumorale. C'est une spécialisation de la matrice extracellulaire, limitant entièrement les structures épithéliales et vasculaires. Elle forme une frontière avec le tissu conjonctif. Les membranes basales sont constituées essentiellement de laminine, de collagène de type IV, de fibronectine, de protéoglycane d'héparane sulfate. Elles jouent un rôle primordial dans la morphogénèse, la différenciation cellulaire, l'architecture tissulaire et l'adhérence cellulaire [223].

L'**héparanase** est une enzyme normalement exprimée par les cellules normales, permettant de réguler indirectement la mitogenèse, la néo-vascularisation et la réparation des tissus. Un de ces mécanismes d'action est de cliver le protéoglycane d'héparane sulfate. Ce glycosaminoglycane est présent à la surface des cellules endothéliales et assure la cohésion de la membrane basale (matrice extracellulaire). Le clivage de ce protéoglycane entraîne la libération de facteurs de croissance. L'héparanase étant surexprimée par les cellules tumorales, elle favorise alors les métastases et leur néovascularisation [223]. Ces phénomènes sont essentiels à la propagation et à la survie des tumeurs cancéreuses.

L'étude avait pour objectif d'évaluer l'effet du calcium-spirulan isolé à partir de *Spirulina platensis*, sur l'invasion des cellules B16-BL6 de mélanome, cellules 26 M3.1 de carcinome du colon et cellules HT-1080 de fibrosarcome. Un mécanisme d'inhibition de l'invasion a été mis en évidence grâce à l'étude de la capacité des cellules tumorales à traverser une membrane basale reconstituée à base de Matrigel®.

Cette matrice est une membrane basale reconstituée extraite d'un sarcome de souris, particulièrement riche en protéines de la matrice extracellulaire. Elle est composée de laminine, de collagène IV, d'entactine et de protéoglycane d'héparane sulfate.

Elle constitue un environnement physiologiquement pertinent pour des études concernant la morphologie, la migration ou l'invasion des cellules. Les chercheurs ont constaté que le Ca-SP empêchait de manière significative l'invasion des cellules tumorales, leur migration et leur adhérence, sur la laminine, sans exercer ces effets vis à vis de la fibronectine.

Par ailleurs, chez des souris, sept injections intraveineuses discontinues de 100 μg de Ca-SP ont permis une diminution marquée de la colonisation des poumons par des cellules B16-BL6 de mélanome, dans un modèle expérimental de métastases pulmonaires. En cherchant à expliquer par quel mécanisme le Ca-SP pouvait réduire les métastases pulmonaires, les auteurs de l'étude ont remarqué que l'injection de ce composé engendrait une forte inhibition de la dégradation de l'héparane sulfate [222].

Les résultats de l'ensemble de leurs recherches suggèrent donc que le Ca-SP semble capable d'empêcher l'invasion tumorale de la membrane basale, par la prévention de l'adhérence et de la migration des cellules tumorales sur la laminine et par une inhibition de l'activité de l'héparanase tumorale.

Il serait très intéressant de démontrer cette activité par des études menées chez l'Homme car une telle action serait prometteuse dans le domaine de la cancérologie, notamment au niveau de la réduction de l'invasion tumorale et de la diffusion métastatique.

□ Effets sur la régression des tumeurs de poche buccale de hamsters [224]

La régression du carcinome de la poche buccale de hamster (sac laryngé sous-épiglottique) a été étudiée après injection locale d'alpha-tocopherol, de canthaxanthine (caroténoïde non précurseur de vitamine A) et d'un extrait composé de spiruline + *Dunaliella* (algue verte halophile que l'on peut trouver plus particulièrement dans les marais salants ou dans des zones de salinité moyenne). L'étude a montré que la régression de ce cancer était accompagnée d'une induction significative de TNF- α (facteur de nécrose de tumeur) dans les macrophages du secteur de la tumeur, suggérant un mécanisme possible de destruction de tumeur. Pour les besoins de l'étude, 140 jeunes hamsters mâles ont été divisés en sept groupes égaux de 20 animaux. Des carcinomes épidermoïdes ont été induits dans les poches buccales droites, par application sur la peau d'une solution à 0,5 % de 7,12-diméthylbenz(a)anthracène (produit reconnu pour engendrer des épithéliomas spinocellulaires), pendant 14 semaines, à raison de trois fois par semaine. Les groupes 1 et 2 ont servi de groupe témoin car ils n'ont reçu que du placebo en guise de traitement. Les hamsters des groupes 3 à 7 ont respectivement reçu, deux fois par semaine, une injection dans les poches buccales droites de 0,1 ml d'acide 13-cis-retinoïque (1,9 mg/ml), de canthaxanthine, d'algues extrait, de β -carotène et d' α -tocopherol.

Des études scientifiques préliminaires ont déjà démontré l'efficacité de l'acide 13-cis-retinoïque, de la canthaxanthine, du β -carotène et de l' α -tocopherol sur la régression de ce cancer. Il s'agissait donc ici d'évaluer l'efficacité de l'extrait par comparaison à celle de ces substances.

Au bout de quatre semaines de ce traitement, les animaux ont été sacrifiés et les poches buccales droites ont été excisées. Selon les groupes, les tumeurs ont montré des degrés de régression variables :

- aucune régression tumorale n'a été constatée dans les groupes témoin ;
- une régression totale de tumeur a été observée chez 30 % des hamsters du groupe 5 (spiruline + *Dunaliella*), chez 20 % de ceux du groupe 6 (β -carotène) et chez 15 % de ceux du groupe 4 (canthaxanthine) ;
- une régression partielle de la tumeur a été constatée chez 70 % des animaux restant du groupe 5, chez 80 % de ceux du groupe 6 et 85 % de ceux du groupe 4 ;
- aucun des hamsters traités par l'acide rétinoïque (groupe 3) n'a montré de régression totale de la tumeur, mais 70 % d'entre eux ont montré une régression partielle.

Par ailleurs, l'extrait testé s'est toujours révélé être plus efficace que le β -carotène seul, ce qui suggère un effet synergique entre ses divers composants.

La présence et la quantité de TNF- α a été évaluée par des techniques d'immunohistochimie. Les chercheurs ont ainsi pu observer une augmentation très significative du nombre de macrophages activés sécrétant de TNF- α , dans les tumeurs des poches buccales des animaux des groupes 5 (spiruline + *Dunaliella*), 6 (β -carotène) et 7 (α -tocopherol). Par comparaison, un plus petit nombre de ces macrophages a été retrouvé dans les poches des hamsters du groupe 4 (canthaxanthine) et encore moins dans celles des hamsters du groupe 3 (acide 13-cis-rétinoïque) [225].

Une étude menée sur ce sujet ultérieurement par Schwartz et al [226] a permis de montrer que l'effet précédemment observé de la spiruline sur l'épithélioma spinocellulaire de hamster était liée à sa phycocyanine. Celle-ci, administrée oralement (140 μ g tous les trois jours pendant 28 jours) a exercé un effet cytostatique et cytotoxique, uniquement envers les cellules tumorales. Les carcinomes qui commençaient à se développer ont été détruits par une réaction immunologique : en effet, un infiltrat dense de lymphocytes et de monocytes a été constaté sur le site tumoral. Les monocytes se sont avérés cytotoxiques envers les cellules tumorales, par le biais d'une sécrétion augmentée de TNF- α et les lymphocytes se sont avérés être des cellules T.

Cet effet a été récemment évalué chez l'Homme ; la littérature scientifique rapporte effectivement les résultats de deux études menées en 2000 [227].

Une équipe de chercheurs, travaillant à *Osaka Center for Cancer and Cardiovascular Diseases*, a mené ses essais sur un groupe de 12 adultes de sexe masculin. Ils ont pu montrer que la prise de spiruline avait augmenté non seulement le nombre de cellules NK, mais aussi leur efficacité. Cette augmentation s'est avérée effective une à deux semaines après le début de la prise de spiruline et s'est poursuivie jusqu'à 12 à 24 semaines après l'arrêt du traitement.

La seconde étude a été conduite par des chercheurs de la *Davis School of Medicine*. Elle a montré que la spiruline augmentait la production d'IFN- γ , ainsi que le nombre et l'efficacité des cellules NK.

Bien que ces deux études aient été menées sur un petit échantillon de sujets, elles viennent confirmer l'intérêt de poursuivre les recherches afin d'apporter des preuves des bénéfices de la spiruline dans la prévention et le traitement adjuvant de certaines pathologies cancéreuses.

2.3 Activité détoxifiante et protectrice de certains organes

Ces effets seraient liés à la phycocyanine, laquelle est rappelons-le, le principal pigment de la spiruline, retrouvé nulle part ailleurs. Elle est constituée d'une structure protéique reliée à un chromophore : la phycocyanobiline. Elle se compose du même noyau tétrapyrrolique que la chlorophylle, et possède en plus de l'atome de magnésium, un ion fer. Globalement, cette structure est proche de celle des pigments biliaires, et cela permettrait d'expliquer en partie l'activité détoxifiante et hépatoprotectrice.

□ Protection du foie contre le stress oxydant hépatique [228]

Les cellules de Küpffer, situées dans le foie, fonctionnent comme des macrophages ; elles contribuent donc aux mécanismes de défense de l'organisme en phagocytant des bactéries, virus, particules étrangères et débris cellulaires. Mais, lorsque leurs activités sont exacerbées, elles peuvent provoquer une cytotoxicité et une inflammation car elles représentent un des principaux sites de formation des dérivés réactifs de l'oxygène. En effet, au cours de la phagocytose, un processus métabolique connu sous le nom de "poussée respiratoire", apparaît dans les macrophages activés et conduit à l'activation d'une oxydase membranaire, laquelle catalyse la réduction de O_2 en $O_2^{\bullet-}$. Cet anion superoxyde est extrêmement toxique pour les microorganismes ingérés, mais il génère aussi la production d'autres agents oxydants puissants : les radicaux OH^{\bullet} et $H_2O_2^{\bullet}$ [194].

Le but de cette étude était d'évaluer l'influence de la phycocyanine sur le fonctionnement des cellules de Küpffer, en présence de stress oxydant, en considérant ses propriétés antioxydantes et anti-inflammatoires.

D'une part, ses effets sur la phagocytose et sur l'activité de "poussée respiratoire" ont été étudiés sur des foies isolés de souris, placés sous perfusion.

D'autre part, les chercheurs ont aussi étudié l'influence de la phycocyanine sur le TNF- α (cytokine pro-inflammatoire), sur les taux de nitrites sériques et sur l'activité de la Nitrite Oxyde Synthétase (NOS) hépatique, chez des rats soumis à une administration d'hormone thyroïde tri-iodothyronine (T3), condition connue pour générer un stress oxydatif hépatique, avec une activité accrue des cellules de Küpffer.

Les chercheurs ont constaté que sans prétraitement avec de la phycocyanine, les niveaux de TNF- α dans le sérum ont été multipliés par 82 suite à l'hyperthyroïdie.

Par contre, cet effet a été supprimé par un prétraitement à la phycocyanine ; cet effet supprimeur s'est avéré comparable à celui engendré par l'alpha tocophérol (antioxydant), ou par le chlorure de gadolinium (agent destructeur des cellules de Küpffer).

La phycocyanine a aussi supprimé l'augmentation des niveaux de nitrites sériques (234 %), ainsi que l'activité des NOS hépatiques (75 %) provoquées par la T3.

La phycocyanine semble donc capable de diminuer significativement la "poussée respiratoire" résultante de la suractivité phagocytaire des cellules de Küpffer. Cet effet pourrait contribuer à une abolition du stress oxydant induit par le TNF-alpha et les NO produits, en réponse à l'état d'hyperthyroïdie.

- ❑ Protection du foie contre la toxicité induite par le tétrachlorure de carbone [229]

Cette étude porte sur l'effet d'un prétraitement par la phycocyanine (issue de *Spirulina platensis*), sur l'hépatotoxicité chez les rats induite par du tétrachlorure de carbone.

L'administration intra-péritonéale (200 mg/kg) d'une dose de phycocyanine aux rats, une ou trois heures avant la stimulation par du tétrachlorure de carbone (0,6 ml/kg), a réduit significativement l'hépatotoxicité induite par ce produit chimique. Par exemple, l'activité de la glutamate pyruvate transaminase sérique était presque égale aux valeurs obtenues chez les rats témoins.

D'autre part, les pertes de cytochrome microsomal P450, de glucose-6-phosphatase et d'aminopyrine-N-déméthylase ont été réduites de façon significative, ce qui suggère que la phycocyanine apporterait une protection aux enzymes hépatiques. A noter que le mécanisme éventuel impliqué dans cette hépatoprotection n'est pas encore élucidé.

- ❑ Protection des reins contre la toxicité induite par l'administration de *cisplatine* chez des rats [230]

Le *cisplatine*, agent alkylant anticancéreux est bien connu pour sa toxicité rénale dose dépendante et cumulative. Récemment, on s'est aperçu que le stress oxydant rénal engendré par cette molécule (même administrée à dose unique) occasionnait un dysfonctionnement rénal.

Des chercheurs ont donc voulu tester l'effet protecteur rénal de la spiruline (par le biais de *Spirulina fusiformis*) vis à vis des effets toxiques induits par le *cisplatine*.

La spiruline, a donc été administrée *per os* à des rats, à des doses de 500, 1 000 et 1 500 mg/kg, pendant une durée de 5 jours (2 jours avant l'administration de 5 mg/kg de *cisplatine* et jusqu'à 3 jours après). La surveillance des dommages causés sur le rein a été effectuée par les mesures de créatinine plasmatique, d'urémie, de clairance à la créatinine et à l'urée, ainsi que les taux de nitrites sériques.

Le degré de stress oxydant rénal a été évalué par le biais du taux des marqueurs de lipoperoxydation (TBARS), le taux de glutathion réduit, et par l'activité enzymatique de la SOD et de la catalase.

Les initiateurs de l'étude ont constaté que l'administration de spiruline, telle qu'elle a été décrite précédemment, a permis de restaurer la fonction rénale, de réduire significativement la peroxydation lipidique, d'augmenter les niveaux de glutathion et d'améliorer l'activité enzymatique de la SOD et de la catalase. Ces effets observés sont dépendants de la dose de spiruline ingérée.

Les résultats de cette étude démontrent clairement le rôle charnière des espèces oxygénées réactives et leur implication dans le dysfonctionnement rénal; ils laissent aussi entrevoir le potentiel thérapeutique de la spiruline, grâce à ses effets antioxydants, dans le cadre des néphrotoxicités induites par le *cisplatine*.

- Protection des reins contre la toxicité induite par le chlorure mercurique, chez des souris suisse albinos [231]

La toxicité rénale du mercure inorganique chez l'Homme et les animaux est bien établie. En effet, le mercure est un métal lourd et ses sels inorganiques endommagent les reins, conduisant à une diminution (oligurie) ou une absence (anurie) de production d'urine, ce qui aboutit à une urémie et à la nécessité de pratiquer des dialyses rénales. Une étude a été réalisée de façon à mettre en évidence l'effet de *Spirulina fusiformis* sur les dommages rénaux induits par le chlorure mercurique.

Pour les besoins de l'étude, les souris albinos suisses ont été divisées en 4 groupes :

- 1) le groupe témoin qui a reçu uniquement du NaCl 0,9 % par voie intra péritonéale ;
- 2) un groupe qui a reçu, par voie intra péritonéale, du HgCl₂ à la dose de 5 mg/kg de poids corporel ;
- 3) un groupe qui a reçu uniquement de la spiruline par voie orale, à la dose de 800 mg/kg de poids corporel ;
- 4) le dernier groupe a reçu du HgCl₂ et de la spiruline aux doses précédemment évoquées.

En ce qui concerne les souris ayant reçu de la spiruline, son administration a débuté 10 jours avant celle du chlorure mercurique et s'est achevée 30 jours après, soit 40 jours au total. Les souris ont été autopsiées 1, 3, 7, 15 et 30 jours après l'administration du toxique. L'activité de la phosphatase alcaline, de la phosphatase acide, de la lactate déshydrogénase et le taux de malondialdéhyde (produit final de la peroxydation lipidique, utilisé comme marqueur biochimique du stress oxydant) ont été mesurés sur un homogénat de reins.

Chez les souris ayant reçu uniquement du HgCl₂, les résultats obtenus montrent une augmentation temps-dépendante significative de la teneur en malondialdéhyde et de l'activité de la phosphatase acide, avec en parallèle une diminution de l'activité de la phosphatase alcaline et de la lactate déshydrogénase.

Le dérivé mercurique a également engendré des altérations pathologiques au niveau des glomérules et des tubules proximaux et distaux. En comparaison, chez les souris ayant reçu de la spiruline et du HgCl₂, on a observé une augmentation de l'activité de la phosphatase alcaline et de la lactate déshydrogénase, avec en parallèle une diminution de la teneur en malondialdéhyde et de l'activité de la phosphatase acide. De plus, on a constaté que les altérations des néphrons étaient significativement moindres dans ce groupe de souris.

En conséquence, il a été conclu de cette étude que *Spirulina fusiformis* était capable de réduire significativement les dommages rénaux causés par le chlorure mercurique, chez les souris.

- Protection des reins contre la toxicité induite par la *gentamicine* ou le *paraminophénol*, chez le rat [231]

La *gentamicine*, antibiotique de la famille des aminosides, engendre une néphrotoxicité dose dépendante. Le *paraminophénol* est un antalgique présentant aussi une toxicité rénale. L'effet d'une supplémentation alimentaire en spiruline (30 % de la ration alimentaire habituelle) sur les dommages causés par ces médicaments, a été testé chez le rat. De la même façon que dans les études précédemment décrites, les chercheurs ont constaté que la spiruline avait permis une réduction significative des effets néphrotoxiques induits par l'administration de l'un ou l'autre de ces médicaments.

- Effet protecteur contre la cardiotoxicité induite par la *doxorubicine* [232]

La *doxorubicine* est un agent anticancéreux intercalant de la famille des anthracyclines. Elle est responsable d'une cardiotoxicité cumulative. Le mécanisme de cette cardiotoxicité résulte de la production d'espèces réactives de l'oxygène et d'un dysfonctionnement mitochondrial. L'objectif de cette étude était de déterminer si la spiruline pouvait servir d'agent cardioprotecteur, dans le cadre d'une administration de *doxorubicine* chez des souris.

Les souris ont reçu de la *doxorubicine* par voie intra-péritonéale, à la dose de 4 mg / kg de poids corporel, une fois par semaine et pendant 4 semaines (schéma thérapeutique utilisé chez l'Homme). La spiruline a été administrée par voie orale pendant 3 jours (deux fois par jour) avant la première injection de *doxorubicine*, puis pendant 7 semaines, les quatre premières étant celles où la *doxorubicine* était administrée.

La toxicité cardiaque a été évaluée 3 semaines après la fin de la période de traitement par l'agent anticancéreux.

Les éléments utilisés pour cette évaluation étaient la mortalité, le volume de l'ascite, la congestion hépatique, le stress oxydatif et les modifications de l'ultrastructure du tissu cardiaque.

Les souris ayant reçu uniquement de la *doxorubicine* ont montré une mortalité plus élevée (53 %) et plus d'ascite. Chez ces souris, les dommages sur le myocarde se sont traduits par une perte de myofibrilles, une vacuolisation cytoplasmique et un gonflement mitochondrial. L'activité de la SOD et de la glutathion peroxydase ont diminué tandis que la peroxydation des lipides a augmenté. Les souris ayant reçu un prétraitement par de la spiruline ont sensiblement été protégées de la toxicité cardiaque induite par l'agent anticancéreux : on a constaté chez elles un taux de mortalité moindre (26 % seulement), moins d'ascite, moins de peroxydation lipidique et une normalisation des enzymes antioxydantes ; de plus, l'étude de l'ultrastructure du myocarde a montré des dommages minimes.

Par ailleurs, il a été démontré, dans une étude *in vitro*, que l'effet cytotoxique de la *doxorubicine* sur des cellules cancéreuses ovariennes, n'était pas compromis par l'utilisation concomitante de la spiruline. L'ensemble de ces résultats suggère que la spiruline exercerait un effet protecteur contre la cardiotoxicité induite par la *doxorubicine* et on peut envisager qu'elle pourrait améliorer l'index thérapeutique de cet agent anticancéreux.

□ Effet protecteur sur le stress oxydant engendré par l'halopéridol [233]

L'*halopéridol* est un médicament neuroleptique très efficace mais dont les effets indésirables extrapyramidaux, limitent souvent l'utilisation chez les patients : mouvements parkinsoniens, dyskinésies tardives, akathisie et dystonies. Une étude a été menée sur des rats afin d'étudier l'influence de la spiruline sur le stress oxydatif et les effets indésirables induits par cette molécule. La prise d'*halopéridol* engendre, en effet, la production de radicaux libres oxygénés impliqués dans l'apparition des dyskinésies tardives. Pour les besoins de l'étude, l'*halopéridol* (1 mg/kg/j, de J0 à J49) a été administré par voie intrapéritonéale chez les rats ; cette dose provoque chez eux des mouvements de mastication sans raison. A partir du vingtième jour de ce traitement, une supplémentation en spiruline a été administrée en plus de l'alimentation habituelle, par sonde gastrique (45, 90 ou 180 mg/kg/j), jusqu'à J49.

L'effet de la spiruline a été évalué par le biais de l'observation des mouvements de mastication dans les différents groupes de rats testés, ainsi que par le dosage des antioxydants enzymatiques ou non.

Les auteurs de l'étude ont remarqué que la supplémentation en spiruline, à la dose de 180 mg/kg/j, avait permis d'améliorer de façon significative le taux des antioxydants (enzymatiques ou non enzymatiques) et de faire régresser les manifestations de dyskinésie tardive chez les rats.

Par conséquent, il est légitime de penser qu'en utilisation chronique, la spiruline, véritable cocktail d'antioxydants, pourrait se révéler capable d'empêcher la neurodégénérescence engendrée consécutivement à la prise d'*halopéridol*. Les autres études menées pour démontrer l'effet antioxydant de la spiruline vont toutes dans le même sens.

□ Action neuroprotectrice vis à vis des effets de l'acide kainique [234]

Les auteurs de cette étude ont essayé de mettre en évidence le rôle de la phycocyanine, dans le cadre d'une toxicité induite par de l'acide kainique administrée chez l'animal. Cet acide est une neurotoxine dont l'effet toxique est attribué à la production d'espèces réactives de l'oxygène. Trois lots de rats ont été utilisés pour les besoins de l'étude : un lot témoin, un lot traité par de l'acide kainique et un lot recevant à la fois de l'acide kainique et de la phycocyanine extraite de spiruline (lot expérimental).

Les résultats ont montré que l'incidence des modifications neurocomportementales se révélait nettement moindre dans le lot des rats ayant reçu de la phycocyanine.

Par ailleurs, l'administration par voie orale de 100 mg/kg de phycocyanine a empêché les troubles comportementaux et les effets néfastes sur les cellules gliales, causés par l'injection d'acide kainique dans l'hippocampe des rats. Les dommages neuronaux engendrés ont été évalués par le biais de la modification des récepteurs périphériques de benzodiazépine (marqueur microglial) et de l'expression de la protéine acide des gliofilaments (marqueur astroglial).

Tout ceci suggère donc un effet protecteur de la phycocyanine sur les neurones. L'étude a aussi permis de constater que la phycocyanine avait diminué l'état épileptique chez les rats du lot expérimental, laissant supposer qu'un usage thérapeutique serait possible dans le cadre du traitement de certaines formes d'épilepsie.

Les auteurs pensent que l'effet protecteur de la phycocyanine dans ce type de dommages neuronaux est probablement lié à ses propriétés antioxydantes et éliminatrices de radicaux libres.

Un aspect intéressant de cette étude est aussi le constat que l'administration par voie orale de la phycocyanine exerce son effet dans l'hippocampe, après avoir traversé la barrière hématoencéphalique. N'ayant pas engendré d'effets indésirables et si son activité était confirmée par d'autres études, la phycocyanine pourrait être employée pour traiter des dommages neuronaux provoqués par un stress oxydant, par exemple dans le cadre des maladies neurodégénératives, telles que la maladie d'Alzheimer ou la maladie de Parkinson.

□ Effets de la spiruline enrichie en zinc chez des patients victimes d'un empoisonnement chronique à l'arsenic [235]

Des millions de personnes au Bangladesh, en Inde, à Taiwan et au Chili ingèrent une quantité élevée d'arsenic en consommant l'eau potable. Plusieurs milliers d'entre eux ont déjà développé un empoisonnement chronique à l'arsenic. Mais, il n'existe aucun traitement spécifique contre l'intoxication lorsqu'elle est causée par une exposition prolongée.

Le mode de toxicité de l'arsenic est lié à son métabolisme dans le corps humain. Après ingestion, l'arsenic inorganique se retrouve rapidement dans la circulation sanguine, où il se fixe principalement à l'hémoglobine. Dans les 24 heures qui suivent, il se retrouve principalement dans le foie, les reins, les poumons, la rate et la peau.

Puis il s'accumule surtout dans la peau. La principale voie d'élimination est l'excrétion par voie urinaire rapide sous les formes trivalente et pentavalente ; près de 90 % de la totalité de l'arsenic est excrété par voie urinaire pendant les douze premières heures. Parmi les voies d'élimination moins importantes, il y a la peau, les cheveux, les ongles et la sueur. Chez l'Homme, la demi-vie de l'arsenic inorganique se situe entre 2 et 40 jours.

L'exposition prolongée à l'arsenic présent dans l'eau de boisson est à l'origine de cancers de la peau, du poumon, de la vessie, du rein, et qu'elle est aussi responsable de changements cutanés tels que les modifications de pigmentation et/ou hyperkératose.

Une étude randomisée *versus* placebo, menée par un service de pharmacologie au Bangladesh, a été conduite dans le but de mettre en évidence les effets d'un extrait de spiruline (250 mg) enrichi en zinc (2 mg) chez des sujets victimes de ce type d'empoisonnement. L'étude a porté sur 41 patients : 17 ont reçu le placebo et 24 ont reçu un extrait de spiruline enrichi en zinc, par voie orale, deux fois par jour pendant 16 semaines. Pendant les 6 premières semaines, les patients ont bu l'eau habituelle (c'est-à-dire non filtrée). Puis, pendant 2 semaines, chacun des sujets de l'étude avait à sa disposition l'eau potable filtrée, grâce à un dispositif installé au niveau de chaque maison. Cette eau filtrée renfermait une quantité non dangereuse d'arsenic.

Puisque les manifestations d'un empoisonnement chronique à l'arsenic apparaissent prioritairement au niveau de la peau, l'efficacité de l'extrait de spiruline-zinc a été évaluée en comparant les manifestations cutanées (scores cliniques) et la teneur en arsenic dans les urines et les cheveux, dans les deux groupes de patients.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau XXI. On s'aperçoit que l'absorption d'une teneur élevée en arsenic s'accompagne d'une plus grande excrétion de ce toxique dans les urines. Après 2 semaines de consommation d'eau filtrée, les chercheurs ont constaté une réduction significative de l'absorption d'arsenic et, par voie de conséquence, de la teneur en arsenic dans les urines. Ils ont aussi observé une forte augmentation de l'excrétion urinaire arsenicale, après 4 semaines du traitement par la spiruline-zinc ($138 \pm 43,6 \mu\text{g/l}$) ; cet effet s'est prolongé pendant encore 2 semaines. De plus, la teneur en arsenic dans les cheveux des sujets du groupe spiruline-zinc était inférieure de 47,1 % par rapport à celle des cheveux du groupe placebo. Par ailleurs aucun effet nuisible de la spiruline n'a été reporté par les médecins qui ont suivi les patients tout au long de l'étude. Les scores cliniques de diagnostic du mélanome, évalués avant et après traitement, n'étaient pas statistiquement significatifs ($p > 0,05$) dans le groupe placebo, alors qu'ils l'étaient dans le groupe traité par l'extrait spiruline-zinc ($p < 0,01$). Dans ce dernier groupe, les scores cliniques de diagnostic d'hyperkératose, établis avant et après traitement, étaient statistiquement significatifs ($p < 0,05$).

	groupe placebo	groupe spiruline-zinc
concentration en arsenic dans de l'eau non filtrée ($\mu\text{g/l}$)	150,1 \pm 18,3	161,7 \pm 23,9
quantité d'arsenic excrétée dans les urines ($\mu\text{g/l}$)	72,1 \pm 14,5	78,4 \pm 19,1
concentration en arsenic dans l'eau filtrée ($\mu\text{g/l}$)	8,3 \pm 3,6	9,7 \pm 5,4
quantité d'arsenic excrétée dans les urines ($\mu\text{g/l}$)	18,4 \pm 7,3	21,6 \pm 5,8

Tableau XXI : Résultats de l'étude menée afin d'évaluer l'efficacité d'un extrait spiruline-zinc administré chez des sujets victimes d'empoisonnement chronique à l'arsenic présent dans leur eau de boisson.

Au vu de ces résultats, on peut penser que l'extrait de spiruline (250 mg) enrichi en zinc (2 mg) administré par voie orale, deux fois par jour pendant 16 semaines, pourrait être utilisé dans le traitement des dommages cutanés (mélanome et hyperkératose), provoqués par une exposition prolongée à l'arsenic contenu dans l'eau de boisson.

2.4 Action anti-inflammatoire

Dans ce qui semble être le premier rapport sur les propriétés antioxydantes et anti-inflammatoires de la phycocyanine, Romay et al. [236] ont prouvé que la phycocyanine pouvait éliminer les radicaux hydroxyle (IC 50 = 0,91 mg/ml) et alcoxyle (IC 50 = 76 μg /ml) avec une puissance comparable à 0,125 mg/ml de diméthylsulfoxyde (DMSO) et à 0,038 μg /ml de Trolox®, éliminateurs spécifiques respectifs de ces deux radicaux.

D'autre part, la phycocyanine a également empêché la peroxydation microsomale des lipides hépatiques (IC 50 = 12 mg/ml).

Il est intéressant de noter que cette activité éliminatrice des espèces réactives oxygénées de la phycocyanine était seulement 3 fois inférieure à celle de la SOD. L'ajout de SOD à la phycocyanine n'ayant pas modifié l'activité antioxydante de la phycocyanine, on peut penser que leur mécanisme d'action est différent.

D'autres études menées par la même équipe ont constaté une activité anti-inflammatoire de la phycocyanine chez quelques modèles d'animaux [237]. Ainsi, ils ont montré que la phycocyanine réduisait sensiblement et de façon dose dépendante, l'œdème d'oreille engendré par l'injection d'acide arachidonique (0,5 mg par oreille) ou d'activateur tissulaire du plasminogène (4 μg par oreille), chez les souris. Cet effet anti-inflammatoire a été également constaté sur l'œdème de la patte de rats mâles (race Sprague Dawley) provoqué par l'injection de carraghénates (0,1 ml d'une suspension à 1 %) et sur le granulome induit par l'introduction d'une boulette de coton stérile dans l'aisselle de rats. L'effet anti-inflammatoire de la phycocyanine a été comparé avec celui de l'indométacine, médicament anti-inflammatoire standard.

La mesure de l'augmentation du poids (en mg) de biopsies d'un morceau d'oreille de 6 millimètres a été comparée chez les rats témoins et chez ceux ayant reçu de la phycocyanine. De la même façon, les chercheurs ont comparé l'activité de la myéloperoxydase, marqueur d'infiltration par les neutrophiles.

L'augmentation de l'épaisseur de patte (en mm) a aussi été comparée. Sept jours après l'implantation du coton, le granulome a été enlevé et son poids sec a été déterminé. Parallèlement, la toxicité aiguë a été évaluée chez les souris et les rats. Les résultats obtenus sont les suivants : l'administration par voie orale de phycocyanine a permis une réduction significative de l'inflammation ($p < 0,05$), dans tous les modèles examinés. Concernant l'essai aigu de toxicité chez les deux espèces animales, même à la dose la plus élevée testée (3 000 mg/kg, *per os*), aucune toxicité de la phycocyanine n'a été observée. Par rapport à l'*indométacine*, la puissance de l'effet anti-inflammatoire de la phycocyanine s'est révélée inférieure ; en effet, la même activité anti-inflammatoire est obtenue avec une dose de 50 à 300 mg/kg *per os* de phycocyanine, contre 3 à 10 mg/kg *per os* du médicament [237].

Néanmoins, la DL 50 (dose de substance causant la mort de 50 % d'une population animale donnée) pour l'*indométacine* était égale à 12 mg/kg chez les rats et 50 mg/kg chez les souris. De plus, ce médicament est responsable de nombreux effets indésirables chez l'Homme, contrairement à la phycocyanine.

A ce stade de l'étude, les auteurs pensent que les propriétés antioxydantes et antiradicalaires de la phycocyanine vis à vis des dérivés actifs de l'oxygène, contribuent en partie à son activité anti-inflammatoire. Ils ont aussi évoqué la possibilité d'un effet modificateur sur le métabolisme de l'acide arachidonique.

Afin de trouver le mécanisme anti-inflammatoire de la phycocyanine, les mêmes chercheurs ont réalisé d'autres expériences. Par exemple, l'influence de la phycocyanine sur la concentration en prostaglandine E2 (PGE2) et sur l'activité de la phospholipase A2 (PLA2) a été déterminée sur un œdème d'oreille de souris induit par de l'acide arachidonique ou du 12-O-tétradécanoyl-phorbol-13-acétate [238]. La phycocyanine (50 à 200 mg/kg *per os*) a inhibé, de façon dose dépendante, la production de PGE2 dans l'oreille des souris traitées avec l'acide arachidonique. Par ailleurs, à la dose de 100 à 400 mg/kg, elle a contribué à réduire modérément l'activité de la PLA2. Dans cette étude, on a comparé l'efficacité de la phycocyanine à celle du *triamcinolone* (10 mg/kg *per os*), médicament de référence pour son effet inhibiteur de l'activité de la PLA2. Les résultats obtenus montrent clairement que les effets anti-inflammatoires de la phycocyanine résultent, au moins partiellement, de l'inhibition de la production de PGE2 et d'une inhibition modérée de l'activité PLA2.

En 2000, une équipe de chercheurs indiens a mis en évidence le fait que la phycocyanine issue de *Spirulina platensis* exerçait un effet inhibiteur sélectif de la cyclooxygénase-2 (COX-2), avec un rapport IC 50 COX-2 / IC 50 COX-1 très bas (0,04). Ils ont conduit deux types d'essais *in vitro* en parallèle : un essai avec une enzyme isolée et un essai sur du sang entier [239]. Dans le premier cas, ils ont constaté que l'importance de l'inhibition dépendait de la période de pré-incubation de la phycocyanine avec l'enzyme COX-2, mais pas de la période de pré-incubation avec la COX-1.

Par ailleurs, la valeur IC 50 obtenue pour l'inhibition de COX-2 par la phycocyanine est beaucoup plus basse (180 nmol/l) que celles obtenues avec le *celecoxib* (255 nmol/l) ou le *rofecoxib* (401 nmol/l), médicaments anti-inflammatoires non stéroïdiens inhibiteurs sélectifs de COX-2.

Dans l'essai mené sur le sang entier, la phycocyanine a inhibé très efficacement la COX-2, avec une valeur IC 50 égale à 80 nmol/l. Les chercheurs ont aussi constaté que la phycocyanine réduite et la phycocyanobiline (chromophore de la phycocyanine), étaient de pauvres inhibiteurs de COX-2 et sans sélectivité vis à vis de celle-ci. Par conséquent, cela laisse penser que c'est l'apoprotéine de la phycocyanine qui pourrait jouer un rôle clé dans l'inhibition sélective de COX-2.

2.5 Effets radio protecteurs

□ Effet protecteur de la spiruline contre les radiations [240]

En 1990-91, l'Institut de Médecine Nucléaire de Minsk (Biélorussie), a mis en place un programme de recherche visant à traiter, tous les 20 jours, 100 enfants souffrant d'empoisonnement lié à la consommation d'aliments cultivés sur les terres radioactives, suite à la pollution provoquée par l'explosion d'un réacteur sur le site de la centrale nucléaire de Tchernobyl, en 1986.

Les résultats de cette étude ont été publiés en 1993 ; ils montrent les effets bénéfiques, sur la santé des enfants, de la supplémentation en spiruline à la dose de 5 g/j. Les scientifiques ont en effet constaté que la spiruline permettait notamment de réduire la dose radioactive reçue après consommation de nourriture contaminée par les radionucléides Césium 137 et Strontium 90. La radioactivité de l'urine de ces enfants était réduite de 50 % au bout de 20 jours de supplémentation en spiruline. Cette dernière semble protéger les cellules de l'organisme contre les effets néfastes des radiations. Lorsque la durée de son administration était de 45 jours consécutifs, la radioactivité des urines des enfants avait diminué de 83 %.

En juillet 2004, un article remis aux ambassades de Suisse et de France à Minsk [241], indique néanmoins que les pectines, polysaccharides naturels, se révèlent plus efficaces que la spiruline pour diminuer la dose radioactive présente dans l'organisme, après ingestion d'aliments contaminés. Traditionnellement utilisée dans la fabrication des confitures, la pectine est aussi utilisée en médecine, sous forme de comprimés et purifiée, dans le traitement des intoxications aux métaux lourds (plomb et mercure). Suite à la catastrophe de Tchernobyl, une firme ukrainienne a développé la pectine de pomme pour le traitement et la prévention des maladies dues au Césium 137 chez des enfants vivant dans les zones contaminées par les retombées radioactives ; elle a obtenu un brevet pour la commercialisation de comprimés effervescents de pectine de pomme en Biélorussie, sous le nom de Yablopekt®. Le Professeur Nesterenko a alors comparé l'efficacité des comprimés effervescents ukrainiens de pectine de pomme ainsi que celle d'une préparation contenant 15 à 16 % de pectine, par rapport à celle de la spiruline. Mélangée à de l'eau ou du lait, cette forme galénique est, selon ce Professeur, « mieux acceptée et tolérée par les enfants et elle s'est révélée au moins aussi efficace que les comprimés effervescents et beaucoup plus efficace que la spiruline ».

Cette efficacité peut s'expliquer par le fait que la pectine, prise oralement, empêche la réabsorption immédiate du radionucléide parvenu dans l'intestin grêle.

Nesterenko a démontré que 3 à 4 cures de 4 semaines de pectine par an, distribuée aux enfants dans les écoles de villages hautement contaminés, parvenaient à maintenir la charge en Césium¹³⁷ en dessous du seuil de 50 becquerels par kilo de poids corporel ;

ce seuil correspond à la valeur à partir de laquelle apparaissent des dégâts irréversibles au niveau du cœur, de l'œil, des systèmes immunitaire et endocrinien, ou d'autres organes.

Cependant, contrairement à la pectine, la spiruline ne se contente pas de réduire la radioactivité dans l'organisme ; en plus de sa capacité à fixer le Césium 137, elle entraîne aussi une augmentation des lymphocytes T suppresseurs. C'est pourquoi la Russie a autorisé la spiruline comme aliment thérapeutique, dans le traitement des enfants souffrant d'empoisonnement suite à la consommation des aliments contaminés par des radionucléides. Leur moelle osseuse étant endommagée, elle ne peut plus produire de globules rouges et blancs normaux ; ces enfants sont anémiques et deviennent rapidement immunodéficients. En leur donnant 5 g de spiruline par jour, ils connaissent un rétablissement extraordinaire en moins de six semaines. Par comparaison, les enfants qui ne bénéficient pas de cette thérapeutique restent gravement immunodéficients.

- Effet radio protecteur de l'extrait de *Spirulina platensis* sur les cellules de moelle osseuse de souris [242]

Cet effet a été étudié par le biais du test du micronoyau dans des érythrocytes polychromatiques de moelle osseuse de souris.

Ce test du micronoyau, en mesurant les aberrations chromosomiques dans les cellules nucléées de moelle osseuse de rongeurs, peut permettre la détection d'une vaste gamme de changements de l'intégrité des chromosomes. Ces changements découlent presque tous, au départ, de la cassure d'un ou de plusieurs chromatides. Les micronoyaux sont des entités nucléaires distinctes du noyau principal, présentes dans le cytoplasme des cellules en interphase et constitués de fragments chromosomiques (effets clastogènes) ou de chromosomes entiers (effets aneugènes) perdus au cours de la mitose. En pratique, ce test est actuellement le seul test de mutagenèse pouvant mettre en évidence les remaniements génomiques consécutifs aux anomalies chromosomiques de nombre et/ou de structure [243].

Dans cette étude, des souris ont été exposées à des radiations gamma, rayonnements ionisants pouvant provoquer des anomalies chromosomiques. Les tissus les plus radiosensibles étant les tissus hématopoïétiques, l'effet protecteur d'un extrait éthanolique de *Spirulina platensis* vis à vis de ce rayonnement, a été évalué par le test du micronoyau ; les chercheurs ont constaté que cet extrait avait permis une réduction importante du nombre de micronoyaux induits par les radiations gamma.

Ils ont aussi noté que l'effet radioprotecteur observé se révélait à peu près identique lorsque l'extrait de spiruline était administré avant ou après l'exposition aux rayonnements. Selon eux, l'extrait de spiruline renfermerait des molécules protectrices agissant comme facteurs stabilisants de l'ADN ; ils ont écarté la possibilité d'un mécanisme éliminateur de radicaux.

Cette capacité de l'extrait éthanolique de spiruline à réduire l'incidence des micronoyaux dans les cellules de moelle osseuse, laisse penser qu'il possède des propriétés antimutagènes et stimulatrices des réparations de l'ADN. Ces résultats sont venus renforcer l'idée émise deux ans plus tôt par Schwartz et al. [244].

- Effet d'un extrait de phycocyanine sur des lésions induites par des radiations chez le rat [245]

Des rats *Wistar* ont été exposés à des rayons X, à des doses de 5 Gy. Une diminution significative de l'activité déshydrogénase, des liaisons phosphates riches en énergie et de l'efficacité de la défense antioxydante, ainsi qu'une augmentation significative du taux de pyruvate, ont été observées pendant 4 semaines. L'étude a montré que le fait de nourrir ces rats avec un extrait de phycocyanine issu de *Spirulina platensis* a permis la correction de ces anomalies.

A noter qu'un résultat similaire a été obtenu, après des injections de tocophérol ou d'un complexe de 6 vitamines hydrosolubles.

2.6 Effets stimulants sur la lignée érythrocytaire

Une étude a été conduite par des scientifiques chinois [246], dans le but d'évaluer les effets des polysaccharides et de la phycocyanine issus de la spiruline, sur le sang périphérique et la moelle osseuse hématopoïétique de souris.

La phycocyanine et les polysaccharides ont été isolés et purifiés à partir de *Spirulina platensis*. En utilisant les techniques de culture de colonies formant des unités érythroïdes (CFU-E) sur des cellules fœtales de foie de souris *in vitro*, les chercheurs ont constaté que la phycocyanine possédait une forte activité stimulatrice de l'érythropoïèse. Ils ont pu établir que 12,5 ng de phycocyanine correspondent à 850 mU d'érythropoïétine (EPO).

Cette hormone, normalement produite par des reins sains, règle la production par les cellules souches, des globules rouges dans la moelle osseuse. Or, les globules rouges du sang contiennent l'hémoglobine permettant la fixation de l'oxygène au niveau des poumons et son transport vers les tissus. L'érythropoïèse est la fonction par laquelle l'organisme assure le renouvellement des globules rouges : chaque jour, 200 milliards sont ainsi produits par la moelle osseuse de l'adulte sain, afin de compenser les pertes physiologiques et l'élimination des globules rouges vieillissants.

Les effets des polysaccharides et de la phycocyanine sur le sang périphérique, sur le système hématopoïétique et sur les cellules souches, ont été étudiés chez des souris normales, irradiées et anémiques.

Les résultats ont démontré la capacité de ces deux constituants à influencer la différenciation et la prolifération des cellules souches hématopoïétiques engagées.

Une récupération a été observée dans des leucocytes et dans des cellules nucléées de moelle osseuse, de même qu'une amélioration du nombre de colonies formant des unités granulocytaires et monocytaires (CFU-GM), chez les souris après injection intra péritonéales d'acide hydrochlorique de benzohydrazine ou après que leur organisme entier ait été soumis à des radiations gamma.

En conclusion, ces recherches ont montré que la phycocyanine issue de la spiruline influait sur les cellules souches situées dans la moelle osseuse, exerçant un effet stimulant sur la production de nouveaux globules rouges et également des globules blancs. Les scientifiques chinois auteurs de l'étude ont en effet observé que la phycocyanine pouvait stimuler la production de cellules blanches, même quand les cellules souches de la moelle osseuse se trouvent endommagées sous l'effet de produits chimiques toxiques ou de radiations.

Etant donné que la phycocyanine et les polysaccharides issus de la spiruline sont capables de diminuer le degré d'anémie de la souris, des essais devraient être menés (à grande échelle) dans la population humaine, de façon à établir si cette activité est susceptible de servir dans le traitement de certaines formes d'anémie.

2.7 Effets sur l'hyperlipidémie, le diabète et l'hypertension artérielle

Les effets de la spiruline sur le métabolisme lipidique ont également été étudiés. Une activité hypocholestérolémiante a notamment été montrée sur des modèles animaux. La spiruline aurait une action inhibitrice sur l'élévation des taux de cholestérol, triglycérides et phospholipides dans le plasma de rats dont l'hyperlipidémie a été introduite par le fructose. Afin de comprendre le mécanisme responsable de cet effet (action sur la lipase des lipoprotéines et/ou sur la lipase des triglycérides hépatiques), d'autres essais ont été menés sur des rats *Wistar* mâles [247]. Les rats témoins ont été alimentés par une ration riche en fructose induisant une hypercholestérolémie. En effet, le fructose est rapidement transformé en acétyl-CoA ou en acide α -glycérophosphorique ; il accroît ainsi l'activité d'enzymes responsables de la synthèse des acides gras telles que l'acétyl-CoA carboxylase et l'acide gras synthétase. Trois autres lots de rats ont reçu en plus de la spiruline, à raison de 5, 10 et 15 %. Les constats ont été les suivants : l'élévation des taux de cholestérol total, de cholestérol HDL, de triglycérides et de phospholipides est inhibée de façon significative quand la ration contient de la spiruline. En outre, la spiruline ne semble pas avoir d'effet sur la teneur de ces différents lipides dans le foie. Ceci est confirmé par le fait que l'activité lipoprotéine lipase est accrue significativement par une alimentation contenant de la spiruline alors que l'activité de la lipase des triglycérides hépatiques ne varie pas. Ces deux activités ont été mesurées dans le plasma, après injection d'héparine qui permet leur libération dans le sang.

Chez l'être humain, les premières études ont été réalisées en 1988, au Japon, par Nakaya et al [248]. Trente hommes en bonne santé mais présentant une hypercholestérolémie et une hypertriglycéridémie modérée ont constaté une réduction de leurs taux de LDL et triglycérides, après consommation de 4,2 g de spiruline par jour pendant huit semaines, le régime alimentaire n'étant pas modifié. Leur taux de cholestérol total a diminué de 4,5 % au bout d'un mois tandis que celui de HDL est resté à son niveau initial.

Les chercheurs ont aussi constaté que lorsque la prise de spiruline était discontinuée, le taux de LDL retrouvait sa valeur initiale.

Selon eux, l'effet bénéfique de la spiruline serait lié à une augmentation de l'activité de la lipoprotéine lipase, enzyme clé du métabolisme des lipoprotéines. En réduisant le taux de LDL, la consommation de spiruline pourrait être bénéfique quant à la prévention des maladies cardiovasculaires.

En effet ce LDL, appelé mauvais cholestérol, s'accumule sur la paroi interne des artères, générant la formation de plaques d'athérome avec un risque élevé d'athérosclérose.

Une autre étude, publiée en décembre 2001 [249], avait pour objectif d'évaluer le rôle de la supplémentation en spiruline sur la glycémie et les taux de lipides sanguins. Vingt-cinq sujets présentant un diabète de type 2 ont été aléatoirement répartis en deux groupes : le groupe 1 a reçu 2 g par jour de spiruline pendant 2 mois ; le groupe 2, supplémenté par un placebo, constituait le groupe témoin.

L'efficacité de la supplémentation en spiruline a été déterminée en comparant les taux de glucose dans le sang des sujets, avant et après la supplémentation. Le profil lipidique et la valeur de l'hémoglobine glyquée HbA1c ont également été analysés chez tous les sujets.

La supplémentation, pendant une durée de deux mois, a eu comme conséquence une réduction significative des glycémies à jeun et post-prandiales. La valeur de l'HbA1c s'est également révélée plus basse, ce qui suggère une amélioration de l'équilibre glycémique sur du long terme. En ce qui concerne l'évolution du profil lipidique, les chercheurs ont constaté une baisse significative du taux de triglycérides ; la réduction des taux de cholestérol total et de LDL-cholestérol a été couplée avec une légère augmentation du taux de HDL-cholestérol. Les indices d'athérogénicité (cholestérol total/HDL-cholestérol et LDL-cholestérol/HDL-cholestérol) ont donc diminué, ce qui permet de réduire le risque cardiovasculaire. D'autre part, le taux de l'apolipoprotéine B (fraction protéique majeure des LDL petites et denses très athérogènes) avait significativement baissé tandis que celui de l'apolipoprotéine A1 (fraction protéique majeure des lipoprotéines HDL protectrices) était plus élevé. Le rapport apo A1/apo B étant augmenté, le risque cardiovasculaire est abaissé.

L'ensemble de ces résultats suggère donc que la supplémentation régulière en spiruline (2 g par jour) semble bénéfique pour le contrôle du diabète de type 2 et pour l'obtention d'un meilleur profil lipidique, de façon à prévenir le risque cardiovasculaire.

Après supplémentation en spiruline, la modification du spectre des lipides, l'état immunologique et la coagulation ont été évalués chez 68 patients présentant une cardiopathie ischémique avec des plaques d'athérome sur les artères [250]. Il a été constaté que la consommation régulière de celle-ci a eu pour effet de corriger les réactions en cascade de procoagulation ainsi que les réactions immunopathologiques, caractéristiques du processus d'athérosclérose.

Une étude a également été menée dans le but d'évaluer les effets de la spiruline chez des patients présentant une hyperlipidémie consécutive à un syndrome néphrotique [251].

En cas de syndrome néphrotique, de grandes quantités de protéines plasmatiques sont perdues dans les urines, ce qui engendre une diminution de la pression oncotique. Pour répondre à ceci, le foie synthétise plus de protéines, notamment l'albumine mais aussi des lipoprotéines, ce qui induit une hyperlipidémie secondaire. On sait déjà que les acides gras essentiels tel que l'acide gamma-linolénique (GLA) peuvent empêcher l'accumulation du cholestérol dans l'organisme. Or, la spiruline renferme justement une quantité appréciable de GLA.

L'étude, d'une durée de deux mois, a été menée sur 23 patients âgés de 2 à 13 ans et présentant un syndrome néphrotique. Ils ont été séparés en deux groupes : le groupe 1 a reçu, en guise de traitement, le médicament habituel ; le groupe 2 a reçu le même médicament plus 1 g de spiruline par jour. La taille, le poids, la glycémie à jeun et les taux de triglycérides, de cholestérol total, de LDL et HDL-cholestérol ont été mesurés au début et à la fin de l'étude. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau XXII

	groupe 1 (médicament seul)	groupe 2 (médicament + spiruline)
taux de cholestérol total	baisse de 69,87 mg/dl	baisse de 116,33 mg/dl
taux de LDL-cholestérol	baisse de 61,13 mg/dl	baisse de 94,14 mg/dl
taux de triglycérides	baisse de 22,62 mg/dl	baisse de 67,72 mg/dl
LDL-cholestérol / HDL-cholestérol	baisse de 1,13	baisse de 1,66
cholestérol total / HDL-cholestérol	baisse de 1,19	baisse de 1,96
HDL-cholestérol / LDL-cholestérol	augmentation significative	augmentation significative

Tableau XXII : Résultats de l'étude menée sur les enfants atteints de syndrome néphrotique

Ces résultats montrent que la spiruline à la dose de 1 g par jour pendant 2 mois a contribué à la réduction des paramètres lipidiques néfastes, tout en maintenant le taux de HDL-cholestérol.

L'objectif d'une étude très récente (novembre 2007) consistait à évaluer les effets chez l'Homme de la supplémentation orale de 4,5 g par jour de *Spirulina maxima* pendant 6 semaines, sur les taux de lipides sériques, la glycémie et la tension artérielle. Elle a été menée sur 36 sujets volontaires (16 hommes et 20 femmes), âgés de 18 à 65 ans [252]. Ces sujets n'ont pas modifié leurs habitudes alimentaires ni leur mode de vie pendant la durée de l'étude.

Sur chacun, un échantillon de sang a été prélevé après un jeûne de 12 heures, afin de déterminer les concentrations plasmatiques en glucose, en triglycérides, en cholestérol total, en HDL-cholestérol et en aspartate aminotransférase. Des mesures anthropométriques comprenant la tension artérielle, la taille, le poids et l'index de masse corporel (BMI) ont été également réalisées.

Les résultats obtenus en comparant les valeurs de début et de fin d'étude montrent qu'il n'y a pas de changement significatif concernant les valeurs de la glycémie et de l'aspartate aminotransférase. En revanche, des différences significatives ont été observées pour les autres valeurs, comme le montre le tableau XXIII :

	valeurs au début de l'étude	valeurs au terme de l'étude	significativité
triglycérides (mg/dl)	233,7 ± 177,8	167,7 ± 100,7	p < 0,001
cholestérol total (mg/dl)	181,7 ± 37,5	163,5 ± 34,4	p < 0,001
HDL-cholestérol (mg/dl)	43,5 ± 14,4	50 ± 18,8	p < 0,01
Pression artérielle systolique (mmHg)	hommes : 121 ± 9 femmes : 120 ± 9,5	hommes : 111 ± 8 femmes : 109 ± 11	p < 0,01 p < 0,002
pression artérielle diastolique (mmHg)	hommes : 85 ± 6,5 femmes : 85 ± 11	hommes : 77 ± 9 femmes : 79 ± 7,5	p < 0,01 p < 0,03

Tableau XXIII : Résultats de l'étude des effets d'une supplémentation en spiruline sur les taux de triglycérides, cholestérol et la pression artérielle, chez 36 sujets

Les variations de concentration en HDL-cholestérol et en cholestérol total se sont révélées dépendantes de la concentration en triglycérides, avec respectivement p = 0,247 et p = 0,108. Les valeurs calculées des concentrations plasmatiques en LDL-cholestérol ont été sensiblement réduites suite à la consommation de spiruline, mais indépendamment des changements du taux de triglycérides

Par ailleurs, des différences significatives ont été constatées sur les valeurs de la tension artérielle, chez les femmes et les hommes (tableau XXIII).

Les résultats de cette étude suggèrent donc que la consommation de spiruline à la dose de 4,5 g par jour exercerait un effet hypolipémiant direct sur les triglycérides et le LDL-cholestérol, et indirect sur les taux de cholestérol total et d'HDL-cholestérol. Elle permettrait aussi de diminuer les valeurs de la pression artérielle systolique et diastolique.

2.8 Effets sur la flore intestinale

Une étude conduite chez le rat [253] a montré qu'un régime alimentaire quotidien enrichi en spiruline (5 %) pendant 100 jours, avait permis une augmentation de 13 % du poids de leur cæcum et de plus de 300 % sa teneur en *Lactobacillus* et *Bifidus*, par rapport à des rats non nourris avec de la spiruline. Par ailleurs, le taux de vitamine B1 dans le cæcum avait augmenté de 43 % ; puisque la spiruline n'apporte pas directement cette quantité de vitamine B1, cela laisse penser qu'elle a permis une meilleure absorption de celle-ci à partir de l'alimentation des rats.

Chez l'Homme, les *Lactobacillus* sont des bactéries hôtes naturels de l'intestin et du colon qui participent à l'équilibre microbien du tube digestif. On les appelle des probiotiques (micro organismes vivants non pathogènes). Ils assurent trois types de fonctions :

- amélioration de la digestion, du transit digestif et de l'absorption des aliments ;
- protection contre les infections par renforcement de la barrière intestinale ;
- stimulation du système immunitaire.

La flore bactérienne intestinale est un équilibre bactérien fragile qui peut être mis à mal à la suite de diarrhées, de colites ou de la prise d'antibiotiques.

Les sujets victimes du syndrome d'immunodéficience acquis (SIDA) présentent une malabsorption des nutriments, liée aux infections opportunistes. Ces infections, provoquées par certains microorganismes comme *Candida albicans*, accentuent l'expression des symptômes de la maladie. D'autre part, les diarrhées fréquentes chez ces patients ou les infections à *E. Coli* en général, contribuent à un déséquilibre des bactéries de l'intestin, au profit des pathogènes. Il est donc conseillé d'adopter, chez les patients infectés, une supplémentation nutritive à base de *Bifidus* et *Lactobacillus*, pour renforcer le combat contre la progression de la maladie. Dans ce cadre, et cela vient compléter ce qui a été écrit précédemment (cf. 2.2.2.), la spiruline pourrait offrir une stratégie intéressante, à la fois thérapeutique et alimentaire, en complément des traitements indispensables.

2.9. Effets dans le cadre d'une déficience chronique en vitamine A

Les conséquences d'un déficit en vitamine A sont nombreuses. Elles sont cependant réversibles, jusqu'à un certain point, par une intervention appropriée, souvent difficile à réaliser au niveau communautaire dans les pays en développement pourtant les plus touchés. Les lésions oculaires représentent les conséquences les plus étudiées de cette carence et sont classiquement regroupées sous le terme de xérophtalmie. On peut observer, au niveau de la rétine, une altération précoce de l'adaptation à l'obscurité (héméralopie) et, au niveau de la cornée, une kératinisation progressive avec atrophie de la conjonctive bulbaire, pouvant aboutir à la cécité. La tache de Bitot apparaît lorsque la xérophtalmie n'est pas traitée. L'affection débute par une sécheresse de la conjonctive puis survient une infiltration de couleur grise dans la cornée.

La dégénérescence de la cornée conduit progressivement à la cécité [254].

En 2001, l'OMS rapporte que 250 millions d'enfants d'âge préscolaire souffrent d'une carence infra-clinique en vitamine A ; trois millions souffrent de xérophtalmie clinique et 300 000 sont aveugles suite à la xérophtalmie.

Une étude, sponsorisée par le gouvernement indien, portant sur 5 000 enfants indiens d'âge préscolaire [255], a démontré l'étonnante efficacité d'une dose quotidienne unique d'1 g de spiruline sur la déficience chronique en vitamine A : le symptôme de la tache de Bitot présent initialement chez 80 % des sujets n'a été retrouvé que chez 10 % d'entre eux, après 150 jours de supplémentation en spiruline.

Cette étude montre que de très faibles doses de spiruline suffisent à réduire considérablement les affections oculaires et les risques de cécité consécutives à la déficience en vitamine A chez l'enfant.

Une autre étude menée sur 400 enfants indiens scolarisés a permis de montrer que la supplémentation régulière en spiruline à la dose d'1 g par jour augmentait leur statut en vitamine A de la même façon que l'administration de vitamine A pure (beaucoup plus chère).

En résumé, les effets immunostimulants, détoxifiants et le potentiel anti-cancéreux de la spiruline ou de ses extraits sont, à mes yeux, ceux qui nécessitent d'être approfondis et prouvés prioritairement.

L'ensemble des études scientifiques actuellement publiées sur le sujet suggère que la spiruline agit sur les organes impliqués dans l'élaboration du système immunitaire (foie, rate, thymus, ganglions lymphatiques, végétations adénoïdes, amygdales et moelle osseuse), tout en stimulant le fonctionnement des cellules immunitaires. Ainsi, non seulement la spiruline semble stimuler la production des éléments du système humoral (anticorps, cytokines) mais elle augmente aussi le nombre et l'efficacité des cellules participant à l'immunité à médiation cellulaire (lymphocytes T, macrophages, cellules B et cellules NK). De plus, la spiruline stimulerait aussi l'immunité muqueuse par augmentation de la production des IgA sécrétoires. Elle diminuerait aussi les réactions inflammatoires allergiques en empêchant la production des Ig E.

Concernant son potentiel éventuel dans la lutte contre le cancer, la spiruline jouerait un rôle favorable par l'intermédiaire de ses polysaccharides membranaires et des agents antioxydants qu'elle renferme. Cinq mécanismes différents ont été mis en évidence à travers les études présentées :

- l'accélération de l'excrétion de substances radioactives mutagènes et la neutralisation de molécules chimicotoxiques mutagènes (effet préventif) ;
- la neutralisation des radicaux libres ;
- la stimulation des endonucléases ;
- la stimulation de la production et de l'efficacité des cellules NK, de l'IFN- γ et du TNF- α ;
- l'inhibition de l'invasion tumorale et métastatique.

Au sujet de ses potentiels antiviraux, le fait que le calcium-spirulan bloque la pénétration de certains virus dans la cellule hôte, empêchant ainsi toute répllication, est aussi très prometteur.

Si tous ces effets venaient à être confirmés par des études pertinentes à plus grande échelle chez des populations humaines variées, la spiruline offrirait en outre deux intérêts majeurs :

- dans le cadre d'un complément thérapeutique curatif destiné à des patients immunodéprimés, puisqu'elle a déjà prouvé sa totale innocuité et l'absence absolue de risque de surdosage (cf. première partie **3.4.1** et **3.4.3**) ;
- associée aux traitements habituels destinés aux cancéreux, aux séropositifs et à tous les malades en général, car elle n'entre pas en compétition avec aucuns d'entre eux ; elle potentialise même leurs effets par son pouvoir stimulant sur le système immunitaire.
De plus, par son effet tonifiant et dynamisant sur un plan métabolique général, elle pourrait même aider les patients à surmonter les effets secondaires inhérents aux thérapies allopathiques.

Troisième partie

La spiruline dans les pays en voie de développement

Grâce à ses qualités nutritives exceptionnelles, la spiruline suscite, depuis plusieurs décennies, un intérêt tout particulier dans le domaine de la lutte contre la malnutrition qui sévit dans les PVD. Cela constitue d'ailleurs, depuis sa redécouverte et jusqu'à ce jour, la principale finalité de son utilisation.

1. Quelques définitions et données épidémiologiques autour de la malnutrition

1.1 La malnutrition

Alors que la famine correspond à manque quantitatif de nourriture, sur un territoire donné et pour une longue période, la **malnutrition** est liée avant tout à la qualité des aliments absorbés, c'est-à-dire à leur valeur nutritionnelle.

Elle se définit comme un état pathologique provenant de l'usage prolongé d'une nourriture ne fournissant pas l'ensemble des éléments nécessaires à la santé (glucides, lipides, protéines, mais aussi et surtout acides gras essentiels, vitamines, minéraux, fibres, etc.). Il existe un déséquilibre cellulaire entre l'approvisionnement en énergie et nutriments d'une part, et les besoins de l'organisme pour assurer sa croissance, ses diverses fonctions et son maintien physiologiquement satisfaisant.

Le terme est aussi employé pour caractériser une alimentation constituée d'apports excessifs ou déséquilibrés en certains nutriments (typiquement graisses, sucres et protéines dans les pays industrialisés). Dans le cadre de ce travail, il n'est question que de malnutrition par sous-alimentation.

Lorsque le déficit alimentaire résulte surtout d'un déficit énergétique et protéique, on parle de **malnutrition protéino-énergétique** (MPE).

Si le déficit porte surtout sur le fer, on parle d'anémie nutritionnelle.

Lorsqu'il porte principalement sur la vitamine A, il s'agit d'une avitaminose pouvant conduire à l'apparition de xérophtalmie.

Trois indicateurs anthropométriques sont utilisés pour constater les conséquences de la malnutrition sur le corps humain [256] :

- le retard de croissance (rapport taille/âge)
- l'émaciation ou dépérissement (rapport poids/taille)
- l'insuffisance pondérale (rapport poids/âge).

La MPE peut se manifester de façon légère ou grave [257] [258] :

- on la qualifie de légère lorsque l'alimentation est insuffisante en quantité, pour respecter les besoins en énergie et en protéines, et en qualité. Le problème de la qualité correspond à des déficits en certains acides aminés dits essentiels, certaines vitamines (groupes A et B) ou en fer. Chez les enfants, cela se traduit par un ralentissement voire un arrêt de la croissance et une perte de poids.
- on la qualifie de sévère à partir du moment où l'individu présente soit des oedèmes au niveau des deux pieds, soit une émaciation importante (rapport poids/taille inférieur de 3 écarts-types à la médiane de la population de référence), soit des signes cliniques de malnutrition sévère. Elle peut alors prendre diverses formes, telles que le marasme ou le kwashiorkor [259].

1.2 Le kwashiorkor

Cette forme apparaît à la faveur d'un déséquilibre nutritionnel (régime pauvre en protéines et riche en glucides) dans les semaines ou les mois qui suivent le sevrage [257] [259]. Cette carence en protéines est la source d'un ensemble de perturbations. En effet, elle provoque au niveau cellulaire, une diminution de la synthèse des protéines à demi-vie brève. Cela concerne essentiellement des protéines d'origine hépatique (en fait, la majeure partie des protéines plasmatiques à l'exception des globulines), et également une série d'enzymes fabriquées par le pancréas exocrine et la muqueuse intestinale.

L'hypoalbuminémie qui en résulte entraîne une baisse de la pression oncotique, dont le résultat est la fuite d'eau et de sel dans le liquide interstitiel, ce qui aboutit à la constitution d'œdèmes et d'hypovolémie. Cette hypovolémie engendre une hypersécrétion de l'hormone anti-diurétique et d'aldostérone, favorisant ainsi la rétention hydrosodée et la surcharge cardiaque.

En outre, le mauvais fonctionnement du pancréas exocrine et des cellules intestinales ne permet pas une bonne absorption des aliments, ce qui exacerbe les effets de carence.

Il se crée alors un véritable cercle vicieux qui, s'il n'est pas rompu, va s'emballer et provoquer un déficit tel que le fonctionnement de l'organisme se ralentit voire s'arrête définitivement.

1.3 Le marasme

C'est la forme la plus fréquente. Le régime qui mène au marasme est non seulement pauvre en protéines, comme au cours du kwashiorkor, mais aussi en glucides et en lipides : le déséquilibre est global et homogène [257]. La néoglucogenèse est sollicitée. Par élévation de la cortisolémie, le catabolisme protidique au niveau du muscle strié s'accroît, l'anabolisme protéique hépatique se majore. Ceci provoque la disparition du pannicule adipeux et une fonte des masses musculaires.

Le marasme pur ne s'accompagne donc pas d'une baisse importante des protéines sanguines ni d'œdèmes, contrairement au kwashiorkor [259].

1.4 Le kwashiorkor marasmique

C'est une forme de malnutrition pour laquelle le tableau clinique présente simultanément des signes des deux maladies.

1.5 Données épidémiologiques

Dix ans après le Sommet Mondial de l'Alimentation (SMA) tenu à Rome en 1996, le nombre de personnes sous-alimentées dans le monde demeure obstinément élevé. En 2001-2003, selon les estimations de la FAO, ce nombre s'élevait encore à 854 millions de par le monde, dont 820 millions dans les pays en développement, 25 millions dans les pays en transition vers l'économie de marché et 9 millions dans les pays industrialisés (figure 70) [260].

Pratiquement aucun progrès n'a donc été accompli en ce qui concerne l'objectif du SMA, lequel était de réduire de moitié le nombre de personnes sous-alimentées avant 2015.

La FAO estime que pour atteindre cet objectif dans les pays en développement, il faudrait que le nombre de personnes sous-alimentées diminue de 31 millions par an entre 2001-2003 et 2015 (figure 69) [260].

Les figures 71 et 72 sont des cartes géographiques montrant l'état d'insécurité alimentaire dans le monde en 2005, d'après les chiffres dont dispose la FAO.

Toujours selon la FAO, la sous-alimentation tue, chaque année, près de six millions d'enfants en dessous de 5 ans dans le monde ; cela représente 55 % des décès d'enfants dans les PVD. La plupart meurent de maladies infectieuses – dont la diarrhée, la pneumonie, le paludisme ou la rougeole – alors qu'ils auraient pu survivre si leur système immunitaire n'avait pas été affaibli par la malnutrition.

De son côté, l'UNICEF déclare que, dans l'ensemble du monde en développement, un enfant de moins de cinq ans sur quatre (soit environ 146 millions d'enfants) souffre d'insuffisance pondérale. C'est en Asie du Sud, et dans une moindre mesure en Afrique subsaharienne, que le problème de la sous-alimentation des enfants est le plus grave.

Projections concernant la sous-alimentation dans le monde en développement

	Nombre de personnes sous-alimentées (millions)			Prévalence de la sous-alimentation (pourcentage de la population)		
	1990-92*	2015	Objectif du SMA	1990-92*	2015	Objectif de l'OMD
Pays en développement	823	582	412	20,3	10,1	10,2
Afrique subsaharienne	170	179	85	35,7	21,1	17,9
Proche-Orient et Afrique du Nord	24	36	12	7,6	7,0	3,8
Amérique latine et Caraïbes	60	41	30	13,4	6,6	6,7
Asie du Sud	291	203	146	25,9	12,1	13,0
Asie de l'Est**	277	123	139	16,5	5,8	8,3

Notes
 La période de base pour les projections est 1999-2001 et non pas 2001-03, dernières années pour lesquelles des chiffres relatifs à la sous-alimentation sont présentés dans ce rapport. Plusieurs petits pays ont également été exclus des projections.
 * Les données pour 1990-92 peuvent différer légèrement des chiffres indiqués ailleurs dans le rapport, dans la mesure où les projections reposent sur des estimations de la sous-alimentation qui n'incluent pas les dernières révisions.
 ** Y compris l'Asie du Sud-Est.

Source: FAO

Figure 69 : Projections de la FAO concernant la sous-alimentation dans le monde en développement en 2015. © FAO 2006

Tableau XXIV : Evolution du nombre de personnes sous-alimentées dans les pays en développement et les pays en transition, entre les périodes 1990-1992 et 2001-2003. © FAO 2006

	nombre de personnes sous-alimentées en 1990-1992 (millions)	nombre de personnes sous-alimentées en 2001-2003 (millions)
Monde en développement		
Proche Orient	19,6	31,6
Afrique du Nord	5,4	6,0
Afrique Centrale	22,7	46,8
Afrique de l'Est	75,1	86,9
Afrique Australe	34,1	36,0
Afrique de l'Ouest	37,2	36,5
Asie de l'Est	198,7	159,5
Asie du Sud-Est	80,0	65,3
Asie du Sud	290,4	298,5
Amérique du Sud	42,0	33,3
Amérique Centrale	5,0	7,4
Caraïbes	7,7	6,7
Pays en transition		
Communauté des Etats indépendants	19,1	20,8
Etats Baltés	0,4	0,1
Europe de l'Est	3,9	3,8

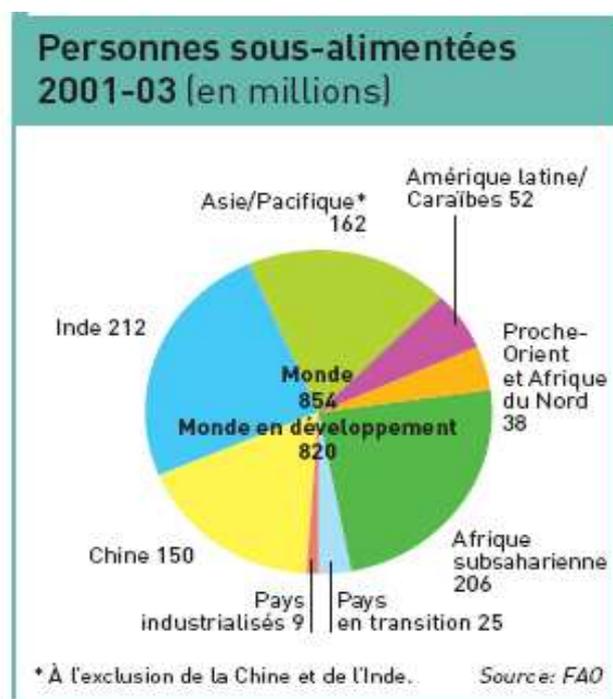


Figure 70 : Graphique circulaire représentant la proportion des personnes sous-alimentées dans le monde, sur la période allant de 2001 à 2003 [260] :

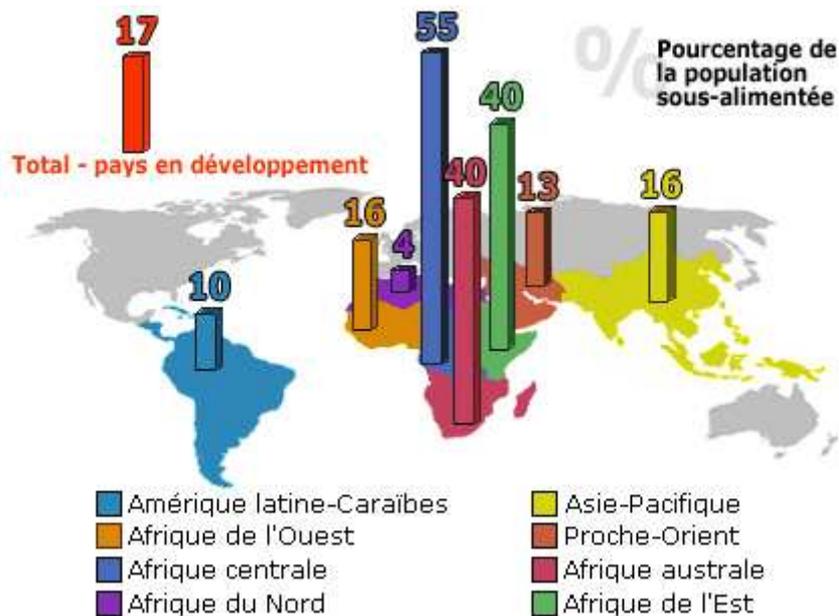


Figure 71 : Représentation de l'état de l'insécurité alimentaire dans le monde en 2005.
© FAO 2005

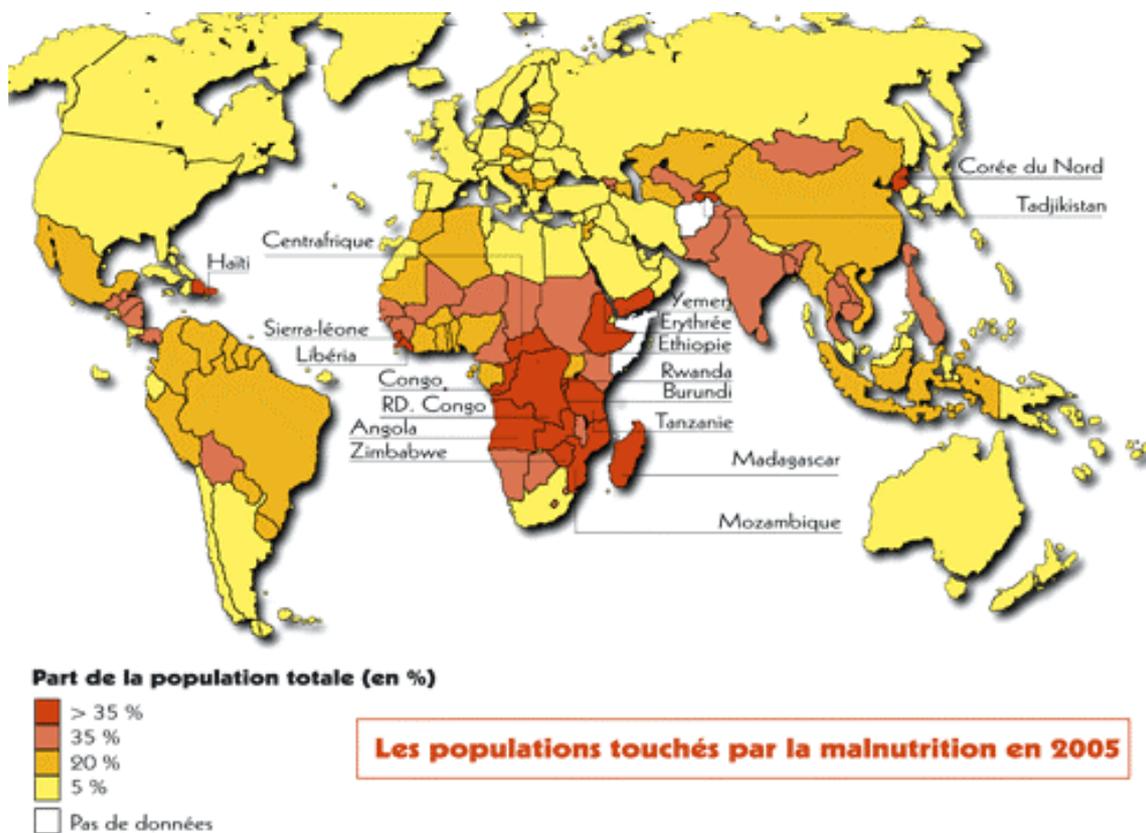


Figure 72 : Carte, actualisée grâce aux dernières données disponibles, représentant les pays touchés par la malnutrition en 2005 [261]

La malnutrition est par ailleurs une urgence nettement moins visible que la famine. En effet, l'UNICEF fait remarquer que les trois quarts des enfants qui meurent de causes liées à la malnutrition, sont atteints de formes modérées ou légères, ne s'accompagnant d'aucun signe extérieur [259].

Toujours selon l'UNICEF, voici l'estimation du nombre d'enfants victimes de maladies évitables chaque années, essentiellement liées à la malnutrition :

- Infections aiguës respiratoires : 2,2 millions
- Maladies diarrhéiques : 2,2 millions
- Périnatalité : 2,1 millions
- Maladies non transmissibles* : 1,2 millions
- Rougeole : 800 000
- SIDA : 700 000
- Diphtérie, coqueluche, tétanos, polio : 700 000
- Accidents : 600 000
- Paludisme : 400 000

* y compris malformations congénitales, problèmes cardiovasculaires, asthme, troubles digestifs, etc...

Face à ces constats désastreux, faut-il rappeler que le droit de chacun à une bonne nutrition relève du droit international, et qu'il apparaissait déjà dans la *Déclaration des droits de l'enfant* (Déclaration de Genève) adoptée en 1924 ?

L'expression la plus complète du droit à la nutrition figure dans la *Convention relative aux droits de l'enfant* de 1989 [262] ; les 191 ratifications en 1997 en font l'instrument des droits de l'homme le plus universellement approuvé de l'histoire. Les Etats qui ont ratifié cette Convention ont de ce fait reconnu le droit qu'a tout enfant de jouir du meilleur état de santé possible et donc son droit à une bonne nutrition avec ses trois composantes vitales : aliments, santé et soins.

2. Causes de la malnutrition dans les pays en voie de développement

La compréhension des causes de la malnutrition est indispensable pour pouvoir apprécier l'ampleur et la profondeur du problème, les progrès déjà accomplis ainsi que les possibilités de progrès futurs.

Les causes de la malnutrition dans les PVD sont multiples et très souvent liées entre elles. Deux causes principales immédiates se distinguent :

l'insuffisance, quantitative et qualitative, de la ration alimentaire et la maladie. Leur interaction tend à créer un cercle vicieux ; l'enfant malnutri, résistant moins bien à la maladie, tombe malade plus souvent, et de ce fait la malnutrition empire.

Les causes sous-jacentes se divisent en trois domaines, et aboutissent aux deux causes précédemment citées : l'insécurité alimentaire des ménages, l'insuffisance des services de santé et d'assainissement, et la mauvaise qualité des soins apportés aux enfants et aux femmes.

2.1 Insécurité alimentaire des ménages

La sécurité alimentaire d'un ménage se définit comme un "accès durable à des denrées alimentaires quantitativement et qualitativement suffisantes pour assurer à tous les membres de la famille, une ration compatible avec une vie saine".

Elle dépend de plusieurs facteurs [263] [264] :

- L'accès aux vivres (accès financier, physique et social), à différencier de la disponibilité des vivres : même si un marché regorge de produits, lorsqu'ils sont chers (viande, fruits et légumes par exemple), alors les familles trop pauvres pour les acheter ne peuvent bénéficier de la sécurité alimentaire.
- La disponibilité des vivres : dans les zones rurales, la sécurité alimentaire dépend de l'accès à la terre et aux autres ressources agricoles requises pour garantir une production familiale suffisante. Or, le manque de terre, la mauvaise qualité des terres et leur éloignement par rapport aux villages, constituent des causes de l'indisponibilité des vivres.
Dans les zones urbaines, où les denrées alimentaires sont surtout achetées sur les marchés, il en faudrait toute une gamme à des prix abordables pour que la sécurité alimentaire soit garantie. Lorsque cette condition n'existe pas, des aides humanitaires peuvent intervenir pour distribuer des denrées à bas prix, aux personnes les plus défavorisées.
- Les conditions climatiques : elles se révèlent peu propices aux cultures, à l'élevage, au stockage, à la transformation et conservation des aliments ; elles contribuent donc à l'extrême précarité de la sécurité alimentaire, notamment dans les zones à climat désertique et celles où les cultures sont souvent détruites par la mousson.
- Le rôle des femmes : elles ont un rôle spécial à jouer dans le maintien de la sécurité alimentaire ; dans la plupart des sociétés, elles assurent seules la préparation, la cuisson, la conservation et le stockage de la nourriture familiale ;

le plus souvent, elles ont aussi la responsabilité de la production et de l'achat des aliments. Or, pour que la sécurité alimentaire du ménage se traduise en une bonne nutrition, il est indispensable d'alléger les femmes de ce fardeau de travail qui les empêche de satisfaire aux besoins de leurs enfants, toujours en rapport avec la nutrition.

- La mauvaise organisation des circuits de distribution de nourriture : elle contribue, encore trop souvent, à des inégalités sur le plan alimentaire.
- La persistance de coutumes traditionnelles : elle a aussi sa part de responsabilité car elle influence la consommation alimentaire ; une valeur symbolique est souvent attribuée à certains aliments pourtant de faible valeur nutritive. De plus, les meilleures parts sont souvent réservées aux hommes, les femmes et enfants mangeant ce qui reste.

2.2 Insuffisance des services de santé et d'assainissement

Un élément essentiel de la bonne santé est l'accès à des services de santé curatifs et préventifs, de bonne qualité et d'un coût abordable. Les familles devraient donc disposer d'un centre de santé à une distance raisonnable, dans lequel exerce du personnel qualifié et équipé pour donner les conseils et prodiguer les soins requis. Or, d'après le Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD), en 1997, dans les 35 pays les plus pauvres de la planète, 30 à 50 % de la population n'a pas les moyens d'accéder à un quelconque service de santé [262].

A noter que dans les PVD, les services préventifs de santé et de nutrition sont souvent moins demandés que les soins curatifs. La prévention est pourtant vitale et d'un excellent rapport coût/efficacité.

Par ailleurs, le manque d'accès à l'eau potable et à un assainissement efficace, favorise l'insalubrité dans et autour des maisons, ce qui contribue à majorer les risques de maladies infectieuses. A l'heure actuelle, plus de 1,1 milliards d'individus sur terre n'ont toujours pas accès à l'eau potable et 2,9 milliards ne disposent pas d'un assainissement satisfaisant [259]. Près de 3 millions d'enfants meurent chaque année de maladies dues au manque d'hygiène et à l'absence d'assainissement.

C'est aux femmes et aux enfants qu'il incombe habituellement d'aller chercher l'eau nécessaire aux besoins du ménage ; cette tâche absorbe beaucoup de temps et d'énergie. A titre d'exemple, les fillettes et les femmes d'Afrique rurale passent au moins 40 milliards d'heures par an à transporter de l'eau. On a estimé qu'en diminuant la distance jusqu'au point d'eau, on permettrait aux femmes de conserver de bonnes réserves d'énergie, jusqu'à 300 à 600 calories par jour.

Par ailleurs, lorsque les aliments sont manipulés sans respect de l'hygiène et que l'environnement, couvert de déchets animaux et humains, est insalubre, les jeunes enfants sont souvent victimes de parasites intestinaux. La transmission est facile et insidieuse : un enfant peut attraper des ankylostomes en marchant pieds nus, des ascaris en mettant ses doigts sales dans sa bouche. Ainsi, il n'est pas rare de voir un enfant héberger jusqu'à 1 000 ankylostomes, ascaris et trichocéphales qui pompent le sang et les nutriments.

Ces parasites constituent donc une cause importante de malnutrition ; ils entravent la croissance et entraînent une anémie grave, de la dysenterie, un retard de puberté et des problèmes d'apprentissage et de mémoire.

En réalité, il existe une intrication entre la maladie et la malnutrition, au point qu'il est parfois difficile de savoir qui est à l'origine de quoi. D'une part, les maladies infectieuses se déclarent plus facilement chez les petits enfants et ceux-ci y résistent moins bien s'ils sont mal nourris.

D'autre part, les infections provoquent aussi la malnutrition, en favorisant l'usure de l'organisme et en augmentant les besoins en protéines ; les diarrhées infectieuses affaiblissent considérablement les enfants et la malnutrition s'installe progressivement.

En dehors des parasitoses intestinales, les maladies comme la rougeole, la coqueluche et les infections broncho-pulmonaires sont fréquentes ; de son côté, le paludisme entraîne des anémies chroniques car il entretient des parasites qui se nourrissent aux dépens des globules rouges.

2.3 Mauvaise qualité des soins apportés aux enfants et aux femmes

La persistance dans les PVD d'une mauvaise qualité des soins prodigués aux enfants et aux femmes, résulte de nombreux facteurs socioculturels et économiques [265] :

- La discrimination à l'égard des femmes et des jeunes filles : en Asie de sud par exemple, les taux très élevés de malnutrition des enfants et d'insuffisance pondérale à la naissance, sont liés au faible accès des femmes à l'éducation ainsi qu'à leur place réduite sur le marché du travail rémunéré.
- Le manque de connaissances au sujet de l'allaitement : les croyances traditionnelles, en prétendant que le colostrum est sale, font qu'il est souvent rejeté. Or, il est indispensable pour que le nouveau né acquiert des défenses immunitaires (anticorps maternels). A noter aussi que les femmes malnutries produisent peu de lait.
Ensuite, à partir de l'âge de 6 mois, les nourrissons devraient recevoir des aliments complémentaires car le lait maternel ne suffit plus à couvrir leurs besoins nutritionnels. Jusqu'à l'âge de 18 mois, ils devraient bénéficier d'au moins quatre repas par jour, faciles à digérer et riches en énergie et nutriments.
D'autre part, les sevrages trop précoces sont à éviter car ils entraînent chez les enfants un refus temporaire de s'alimenter, par manque d'appétit et à cause de la séparation trop brusque avec leur mère.
- L'insuffisance de protection de la santé des enfants : ceux-ci doivent recevoir des soins essentiels et au moment opportun ; il existe ainsi un calendrier précis des vaccinations à pratiquer. Il est donc indispensable que la population ait accès à des informations sanitaires correctes.

- Le faible niveau de ressources financières des pays du tiers-monde : il constitue un facteur majeur de malnutrition : les villages n'ont pas les moyens de s'équiper en infrastructures telles que des écoles, des hôpitaux ou des centres de santé ; cela rend donc difficile l'accès aux besoins vitaux des populations pour sortir de l'engrenage : l'éducation, l'alimentation et la santé.
- Le défaut d'éducation des femmes : il contribue malheureusement à certaines maladresses qui ne font qu'aggraver l'état de leurs enfants ; par exemple, les coutumes traditionnelles employées pour faire cesser les diarrhées et les vomissements engendrent une perte d'appétit chez les enfants malades. Les enfants malades sont mis à la diète alors que les maladies fébriles, bien que coupant l'appétit, augmentent néanmoins les besoins en protéines ; les enfants diarrhéiques sont privés d'eau, ce qui provoque des états de déshydratation plus ou moins sévères.
- L'inégalité dans la division des tâches et des ressources au sein même de la famille et des communautés : toujours favorable aux hommes, elle met en danger le bien-être des enfants et des femmes. En particulier, les femmes enceintes ou allaitantes devraient bénéficier de certaines mesures : supplémentation en aliments de valeur nutritive élevée, suppression des travaux pénibles, temps pour se reposer et assurer les soins pré et postnatals.

Bien entendu et malheureusement, tous les efforts des familles pour assurer une bonne nutrition, peuvent être réduits à néant par les facteurs politiques, économiques et idéologiques régnant dans le pays où elles vivent.

3. Manifestations cliniques et biologiques de la malnutrition

3.1 Aspects cliniques

3.1.1 En cas de kwashiorkor

Ce syndrome atteint généralement l'enfant dans les semaines ou les mois qui suivent le sevrage, c'est-à-dire le plus souvent entre 18 mois et 2 ans et demi.

Le début est progressif et marqué par [263] :

- une diarrhée traînante, très souvent attribuée, à tort ou à raison, à un épisode infectieux banal ;
- des troubles psychomoteurs : l'enfant est triste, grognon et renonce à ses jeux ; puis il perd progressivement l'appétit ;
- des modifications de l'aspect des cheveux, lesquels sont défrisés et ternes.

Tous ces signes apparaissent très progressivement et n'attirent pas l'attention. Pourtant, à ce stade, un simple conseil diététique suffirait à redresser la situation. Cet état précaire peut facilement, être aggravé par la survenue d'un épisode infectieux.

Les œdèmes apparaissent soit progressivement, soit de façon brutale et signalent le passage à la phase d'état. Cette phase d'état est marquée par une symptomatologie beaucoup plus riche :

- l'œdème est le signe le plus frappant : il est ferme mais gardant le godet, indolore et assez nettement déclive ; il apparaît d'abord au dos des pieds et aux paupières, puis s'étend aux membres inférieurs et la face, atteignant parfois le dos des mains, rarement le reste du corps. Il est exceptionnel que les séreuses soient atteintes ;
- les lésions cutanées, muqueuses et phanériennes sont très évocatrices : troubles de la pigmentation (hypochromie ou hyperchromie) ; altérations des cheveux portant sur leur couleur (pâles, roux ou blancs), sur leur texture (défrisés, perdant leur souplesse), et sur leur solidité (ils deviennent cassants et tombent facilement) ;
- l'atteinte de l'état général est évidente avec une accentuation des signes de la phase pré-oedemateuse ; l'enfant devient de plus en plus apathique ; la pâleur du visage est fréquente ; le pannicule adipeux est préservé.

En plus de ces signes, l'enfant souffrant de kwashiorkor a la diarrhée et fait souvent des infections pulmonaires et cutanées. En dehors de l'anémie, il présente aussi des carences en vitamine A et en zinc. Son refus de s'alimenter contraste donc avec ses besoins accrus en nutriments.

3.1.2 En cas de marasme

Le marasme se rencontre le plus souvent au moment de la première année de vie, mais il peut exister à tout âge. Il est très souvent associé aux maladies diarrhéiques.

Les signes cliniques associés à cet état s'opposent à ceux du kwashiorkor par [263] :

- un retard staturo-pondéral très important, plus marqué pour le poids que pour la taille ; ce poids est habituellement inférieur de 60 % par rapport au poids normal pour l'âge ;
- une fonte musculaire et des tissus adipeux sous-cutanés : l'aspect général est celui d'un enfant squelettique avec une relative grosse tête, des articulations saillantes, un gros ventre, des hanches étroites, des fesses plates et fripées ;
- une conservation de l'appétit (au début de l'affection, l'enfant a même réellement faim) ;
- une atteinte moins marquée du caractère (l'enfant reste plus longtemps vif et actif).

Dans l'ensemble, il a l'aspect d'un "petit vieux".
Généralement, l'enfant atteint de marasme est facile à tirer d'affaire parce qu'il mange bien, mais sa récupération est lente.

3.2 Anomalies biologiques

Les anomalies biologiques, sans être spécifiques, sont fréquentes. Leur interprétation est souvent difficile car elles résultent de l'intrication de la malnutrition et de la surinfection [266].

➤ Les protéines sériques

Alors que la protidémie est le plus souvent normale dans le marasme, elle est franchement abaissée dans le kwashiorkor ; l'hypoprotidémie avec un taux d'albumine effondré est même caractéristique de ce syndrome. La préalbumine et l'apolipoprotéine A1 sont également effondrées.

Voici quelque précisions concernant ces protéines sériques :

la **préalbumine** est considérée comme un indicateur précoce de la malnutrition dont la sensibilité est attribuée d'une part à sa synthèse hépatique, et d'autre part à sa demi-vie brève (48 heures). On l'utilise en pédiatrie pour dépister les formes infracliniques de déficience protidique et pour le suivi de l'évolution des diverses formes de MPE déclarées.

L'**apolipoprotéine A1** est également un indicateur précoce de malnutrition ; les avantages qu'il présente par rapport à la préalbumine sont sa meilleure sensibilité à la renutrition et le fait qu'il est très peu influencé par les facteurs infectieux associés à l'état de malnutrition. Par conséquent, l'apolipoprotéine A1 reflète plus spécifiquement l'état nutritionnel que la préalbumine.

L'**albumine**, avec sa demi-vie biologique de 20 jours, est un bon marqueur de dénutrition chronique.

Par ailleurs, l'aminocidémie est très abaissée. Le déficit porte essentiellement sur les acides aminés essentiels ; parmi eux, les acides aminés ramifiés (valine, leucine, isoleucine) sont particulièrement bas.

L'urée sanguine est abaissée, ainsi que l'excrétion urinaire de créatinine sur 24 heures, ce qui reflète la diminution des masses musculaires.

➤ Le bilan hydro-électrolytique

La natrémie est basse mais le capital sodé intracellulaire est augmenté du fait des troubles de la perméabilité des membranes cellulaires.

La kaliémie est basse ou très basse.

L'osmolarité sanguine est très abaissée .

Dans le kwashiorkor, il existe une augmentation du volume total de l'eau et une anomalie de la distribution des compartiments liquidiens avec une inflation du secteur liquidien extracellulaire [263] [266].

➤ Le bilan lipidique

On observe une baisse du cholestérol total et estérifié, suite à la diminution de l'absorption des graisses et aux anomalies de transport. Le rapport cholestérol libre/cholestérol total est fortement augmenté. La synthèse des triglycérides est diminuée.

➤ Le bilan phosphocalcique

La calcémie est le plus souvent normale ; l'hypocalcémie est rare. Par contre la déplétion en phosphore et en magnésium est habituelle, mais généralement asymptomatique.

➤ Modifications hématologiques

L'anémie est fréquente ; d'intensité variable, elle est parfois profonde. En dehors des anémies carencielles, on rencontre aussi des anémies hémolytiques et génotypiques.

➤ Autres anomalies biochimiques

La glycémie est normale ou basse, et souvent instable.

Le taux de zinc plasmatique est abaissé. Il en résulte des troubles cutanés trophiques rencontrés notamment dans le kwashiorkor. Ce déficit en zinc est aussi en partie responsable de l'installation de l'anorexie par modification du goût, et/ou à des troubles du comportement.

Le taux de l'amylase sérique est abaissé.

Les phosphatases alcalines sont abaissées, de même que les vitamines hydro et liposolubles.

Une baisse de l'immunité est également constatée [266].

4. Evolution et pronostic

En l'absence de traitement, l'évolution est grave puisque dans 8 cas sur 10, l'enfant décède en quelques jours ou au maximum quelques semaines après l'apparition des œdèmes ; dans les deux autres cas, si l'enfant arrive à surmonter le risque vital, il est exposé à des séquelles parfois irréversibles [258].

Du point de vue pronostic à court terme, la mortalité est de nos jours encore très élevée, pour les individus des PVD souffrant de MPE sévère. Le plus mauvais pronostic est constaté chez les enfants présentant des troubles hydro-électrolytiques ou des infections graves. Beaucoup d'autres signes sont aussi de mauvais pronostic :

- la disparition de la boule graisseuse de Bichat ;
- l'hypoglycémie profonde ;
- le déficit en magnésium ;
- l'apparition d'une hépatomégalie et de pétéchies.

Le pronostic à long terme est essentiellement représenté par le développement psychointellectuel. En effet, les enfants qui ont souffert de MPE sévère développent plus fréquemment des troubles du comportement, et tendent à manifester des traits antisociaux.

5. Conséquences de la malnutrition à plus ou moins long terme

Les enfants sévèrement malnutris sont rapidement exposés à plusieurs risques potentiellement mortels, correspondant aux complications de la MPE ; voici les problèmes rencontrés à **court et moyen terme** [264] :

- Les infections :
elles sont indissociables, synergiques et d'étiologie diverse : bactériennes, virales, parasitaires ou mycosiques. Elles peuvent toucher tous les organes : tractus digestif et sphères ORL, broncho-pulmonaire et uro-génitale.
La fièvre est inconstante alors que l'anorexie est par contre constante.
Chez le malnutri, le paludisme prend une forme cholérique avec diarrhée profuse.
La figure 73 montre la part de responsabilité de ces infections dans le décès des enfants malnutris dans les PVD en 1995, d'après l'OMS.
- Les troubles de la thermorégulation :
Ils sont associés à une augmentation de la mortalité chez les enfants sévèrement malnutris. On estime qu'il y a hypothermie si la température axillaire est inférieure à 35°C. L'hypothermie et l'hypoglycémie surviennent généralement ensemble et sont souvent associées à la septicémie.
L'hypothermie, principalement rencontrée dans le marasme, est très souvent mortelle.

- L'hypoglycémie : tous les enfants sévèrement malnutris doivent être considérés comme potentiellement hypoglycémiques.

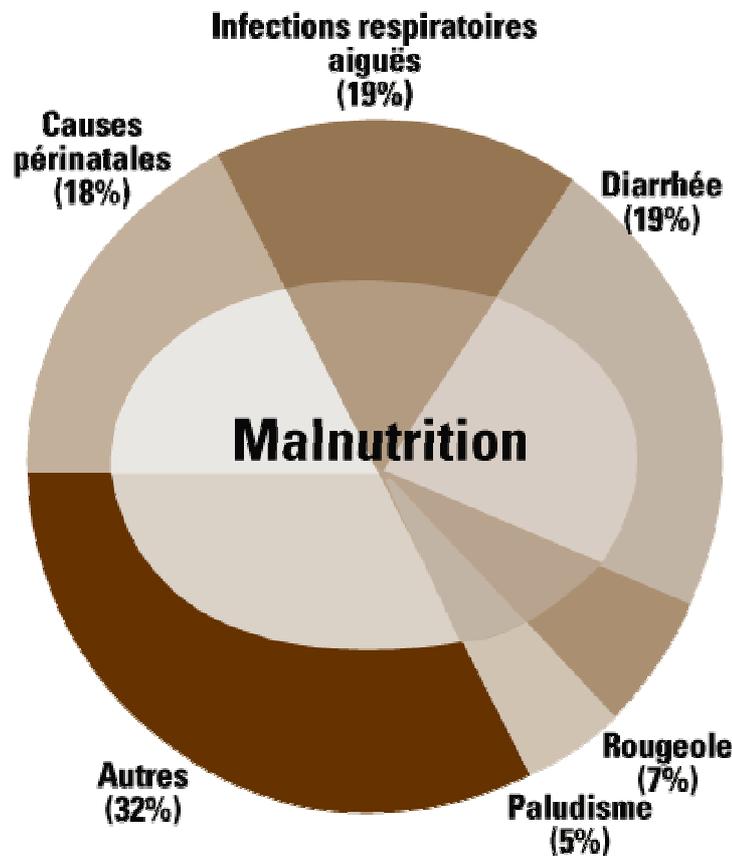


Figure 73 : Données épidémiologiques concernant les différentes causes de mortalité, chez les enfants, liées à la malnutrition. Source : DMS, d'après C.J.L. Murray and A.D. Lopez, *The Global Burden of Disease*, Harvard University Press, Cambridge, USA, 1996; et D.L. Pelletier, E.A. Frongillo and J.P. Habicht, 'Epidemiological evidence for a potentiating effect of malnutrition on child mortality', in *American Journal of Public Health*, 1993, p. 83 [267].

- La défaillance cardiaque : elle se voit surtout dans le kwashiorkor. Cette insuffisance cardiaque est responsable de la mort dans bien des cas de kwashiorkor. Elle est le plus souvent globale (insuffisance des ventricules droit et gauche). Il faut soupçonner une insuffisance cardiaque dès lors que le poids n'a pas chuté malgré la fonte des œdèmes.
- Les troubles hydro-électrolytiques : tous les enfants sévèrement malnutris ont des déficits en potassium et en magnésium. Les œdèmes sont en partie le résultat de ces déficits. Par contre il y a toujours un excès de sodium dans l'organisme, même si la concentration est faible dans le sang. C'est pourquoi il faut s'abstenir de surcharger l'organisme en sodium car il peut tuer l'enfant. Ces déficits peuvent mettre 2 semaines à se corriger.

- Les complications à type de carence nutritionnelle spécifique : les plus fréquentes sont liées aux déficits en fer, vitamines A, B, C, D, iode, zinc et cuivre. Chacun de ces déficits engendre des conséquences néfastes à moyen et long terme ; elles sont précisées un peu plus loin.

Sur le long terme, les conséquences désastreuses de la malnutrition peuvent se diviser en 6, de la façon suivante [268] :

1) Hausse de la mortalité des enfants

Chaque année, la malnutrition contribue, directement ou indirectement, au décès de plus de six millions d'enfants de par le monde [269].

Cette mortalité infantile élevée contribue malheureusement à renforcer le cercle vicieux reliant misère et incitation à une natalité maximale ; d'où une augmentation des besoins en nourriture alors qu'elle ne suffisait déjà pas. Pour ces peuples très pauvres, les enfants constituent, en effet, de la main d'œuvre et la seule "assurance vieillesse" possible.

2) Entrave à la croissance et au développement du cerveau [270]

- La carence en iode est la principale cause évitable d'arriération mentale dans le monde. Un important déficit en iode *in utero* provoque chez le fœtus des lésions cérébrales graves et irréversibles, entraînant une arriération mentale profonde (crétinisme). En effet, La prolifération des neurones du cortex préfrontal a lieu durant la période prénatale. Des carences moins graves peuvent abaisser de 10 points le quotient intellectuel (QI) de l'enfant.
- L'anémie ferriprive chez les nourrissons et les jeunes enfants risque d'abaisser le QI d'environ 9 points.
- La croissance du fœtus est conditionnée par l'état nutritionnel de la mère avant sa grossesse, et le poids pris au cours de celle-ci.
- La carence en acide folique entraîne au premier mois de la grossesse des anomalies du tube neural.
- Le QI peut être réduit de 5 points à la suite d'une insuffisance pondérale à la naissance.
- Il est prouvé que les enfants qui présentent un important retard statural à l'âge de deux ans ont un QI inférieur de 5 à 11 points à celui des enfants de taille normale.
- Une étude a montré que les enfants nourris au sein ont généralement des QI supérieurs d'environ 8 points à ceux des enfants allaités au biberon.

3) Élévation des risques pour la santé maternelle

- L'anémie ferriprive est en cause dans environ 20 % des décès maternels en Afrique et en Asie.
- Le pouvoir de la vitamine A dans la protection des enfants contre la cécité est connu depuis longtemps, mais son aptitude à renforcer la résistance aux infections et à réduire le risque léthal, n'est admis que depuis peu de temps par la communauté scientifique et médicale. Une douzaine d'études menées au Brésil, au Ghana, en Inde, en Indonésie et au Népal, ont prouvé que la supplémentation en vitamine A abaisse de 44 % la mortalité maternelle, de 35 à 50 % la mortalité diarrhéique et de 50 % la mortalité rougeoleuse [267].
- La carence en zinc, très fréquente dans les PVD, est associée à une prolongation du travail pendant l'accouchement, ce qui accroît le risque de décès. Une carence grave semble aussi entraver le développement fœtal. Diverses études montrent que la supplémentation en zinc réduit les complications de la grossesse.
- La carence en iode accroît le risque de fausse-couche et de mortinatalité. De plus, dans certaines régions où le déficit d'apport est important, elle majore la mortalité maternelle par hypothyroïdie sévère.
- En dehors des anomalies du tube neural, la carence en acide folique contribue aussi à augmenter le risque de morbidité et de mortalité maternelles. Elle favorise également l'insuffisance pondérale à la naissance.

4) Incapacités physiques permanentes

- La carence en acide folique entraîne des anomalies du tube neural connues sous le nom de *spina bifida*, chez les nouveau-nés.
- La carence en vitamine D contrarie l'ostéogénèse et peut aboutir au rachitisme.

5) Troubles de l'immunité

La malnutrition exerce un effet nocif sur le système immunitaire, en particulier chez les jeunes enfants et les femmes enceintes. Il est bien établi depuis fort longtemps que le remède contre l'immunodéficience, induite par la malnutrition, est en premier lieu l'assurance d'un régime alimentaire contenant tous les nutriments essentiels.

Le zinc, indispensable à la croissance et au développement des cellules, est tout aussi vital pour le bon fonctionnement du système immunitaire. En outre, plusieurs études ont mis en évidence l'existence d'un lien entre la malnutrition au début de la vie (y compris pendant la période fœtale) et l'apparition ultérieure de maladies chroniques : cardiopathies, diabète et hypertension [265].

6) Abaissement de la productivité physique

Les carences en protéines, fer, zinc et vitamine A notamment, ainsi que les maladies infectieuses chroniques liées aux déficits immunitaires, réduisent les capacités de travail.

D'autre part, les retards de croissance et les moindres performances intellectuelles nuisent également aux capacités productives des individus devenus actifs. Au bout du compte, c'est donc le développement économique de ces pays qui est menacé.

Ainsi, dans certains pays, les pertes de vies, les infirmités et la chute de productivité consécutives aux carences en vitamines et en minéraux coûtent plus de 5 % du produit national brut [265].

La malnutrition contribue aussi à entraver l'efficacité des investissements dans les domaines de la santé et de l'éducation.

6. En quoi la spiruline représente-t-elle un espoir dans le combat contre la malnutrition ?

Grâce à sa teneur élevée en protéines de haute valeur biologique et facilement digestibles, ainsi qu'à sa richesse en micro-nutriments essentiels, la spiruline semble constituer un atout majeur dans le traitement des troubles liés à la malnutrition.

Depuis le début des années 90, les essais cliniques se sont multipliés dans le but de convaincre l'ensemble de la communauté scientifique et l'OMS en particulier, de ses effets bénéfiques dans la lutte contre la MPE.

Malheureusement, l'argent manque souvent pour financer des études de rigueur scientifique, seules valables aux yeux des décideurs de programmes nutritionnels dans les PVD. Pour eux, les sourires et cris de joie des enfants qui, s'ils n'avaient pas reçu de spiruline, seraient morts, ne constituent pas des preuves valables.

Par ailleurs, les hôpitaux équipés et les laboratoires d'analyses ne se trouvent généralement pas dans les régions qui abritent les cas les plus sévères de malnutrition, ce qui est un obstacle supplémentaire à l'obtention de données scientifiques.

Le nombre d'études dont les résultats ont été publiés étant limité, voici celles qui servent de référence pour les chercheurs qui étudient la spiruline.

6.1 Réhabilitation nutritionnelle avec la spiruline au Burkina Faso [271]

➤ Contexte de l'étude

Le Burkina Faso est un pays d'Afrique de l'ouest dont 56 % des habitants ont moins de 18 ans et où les femmes représentent plus de la moitié de la population. Avant l'entrée dans le nouveau millénaire, les taux de mortalité infantile et de mortalité des moins de 5 ans ont diminué. En revanche, la santé des enfants s'est dégradée à cause du paludisme, des infections respiratoires aiguës, de la diarrhée et de la malnutrition. La pauvreté a encore aggravé la situation des femmes et des enfants [272].

Par ailleurs, ce pays est l'un des plus pauvres au monde selon le rapport du PNUD publié en 2001 : 61,2 % de la population vit en deçà du seuil de pauvreté monétaire (1\$/j). De plus, le taux de croissance de la population est très élevé : en 1975, le pays compte 6,2 millions d'habitants, en 1999 il y en avait 11,2 millions et les prévisions parlent de 18,5 millions en 2015.

En 2005, la situation est la suivante [272] :

- le taux de mortalité des moins de 5 ans est égal à 191 ‰ ;
- le taux de mortalité infantile est égal à 96 ‰ ;
- 19 % des nouveaux-nés présentent une insuffisance pondérale à la naissance ;
- 38 % des enfants de moins de 5 ans souffrent d'insuffisance pondérale modérée à grave ;
- 14 % des enfants de moins de 5 ans souffrent d'insuffisance pondérale grave ;
- 19 % des enfants de moins de 5 ans souffrent d'émaciation modérée à grave ;
- 39 % des enfants de moins de 5 ans souffrent d'un retard de croissance modéré à grave ;
- l'espérance de vie à la naissance est de 48 ans.

Les protéines représentant un luxe inaccessible au plus grand nombre, le Burkina Faso est confronté à la MPE : elle touche actuellement 45 % de la population totale du pays. Les cas de marasme et de kwashiorkor sont nombreux.

D'autre part, 80 % de la population travaille dans le secteur agricole mais ce secteur n'est ni réellement efficace ni adapté au taux de croissance de la population [272] .

Face à ces constats, le pays a décidé de diversifier sa production agricole, afin de rendre les protéines plus abondantes et accessibles financièrement. La rareté de l'eau et l'aridité des sols ont conduit à des essais de culture locale de spiruline. C'est ainsi que le centre de réhabilitation nutritionnelle de Ouagadougou utilise, depuis l'an 2000, de la spiruline en complément de la farine Misola, dans le but d'améliorer l'état des enfants malnutris.

➤ Objectif

Le but de l'étude consistait à évaluer l'impact d'une alimentation composée de spiruline et de Misola, sur l'état nutritionnel d'enfants atteints de malnutrition.

➤ Méthodologie utilisée

Le Misola est une farine locale, composée de 60 % de millet grillé, 20 % de soja grillé, 10 % d'arachide, 9 % de sucre et 1 % de sel. Elle est produite par le CREN (centre de renutrition et d'éducation nutritionnelle) du Centre Médical St Camille (CMSC) de Ouagadougou. La spiruline utilisée pour l'expérience est cultivée dans des bassins artificiels construits au sein même du CMSC.

L'étude s'est déroulée en 2005, dans ce centre médical. Elle a porté sur un échantillon de 550 enfants malnutris, dont l'âge était compris entre 6 mois et 5 ans. La répartition de ces enfants, selon leur forme de MPE, était la suivante :

- 455 présentaient un marasme sévère ;
- 57 présentaient un marasme moyennement sévère ;
- 38 présentaient un kwashiorkor en plus du marasme.

Tous ces enfants ont été répartis en 4 groupes, selon le type d'alimentation qu'ils ont reçu pendant toute la durée de l'étude :

- o **groupe 1** : 170 enfants ayant reçu 200 g de Misola (731 ± 7 Kcal par jour) ;
- o **groupe 2** : 170 enfants ayant reçu 10 g de spiruline en plus de 200 g d'aliments traditionnels (millet, légumes et fruits – 748 ± 6 Kcal par jour) ;
- o **groupe 3** : 170 enfants ayant reçu 10 g de spiruline et 200 g de Misola (767 ± 5 Kcal par jour) ;
- o **groupe 4** : 40 enfants n'ayant reçu que 200 g d'aliments traditionnels (722 ± 8 Kcal par jour) ; ils ont servi de groupe-témoin. Il s'agissait d'enfants dont les mères n'avaient pas accepté qu'ils rentrent dans le protocole d'étude. Leurs déficiences en vitamines et minéraux ont cependant été corrigées, après la clôture de l'étude.

L'étude s'est déroulée sur une période allant de la fin de l'année 2002 au début de l'année 2003 ; elle a duré 8 semaines.

La consommation du Misola utilisé apporte 12 % de lipides, 16 % de protéines et 61 % de glucides, soit 410 kcal.

La composition de la spiruline cultivée au CMSC est semblable à celle des spirulines rapportées dans la littérature ; la consommation de 10g fournit 6 % de lipides, 57,10 % de protéines et 13,84 % de glucides, soit 33,8 kcal.

La dose de spiruline fournie quotidiennement aux enfants des groupes 2 et 3 était de 10 g, répartie sur deux repas. Ce sont les mamans qui, sur les conseils des médecins nutritionnistes, étaient chargées de préparer les mélanges destinés à leur enfant. Chaque enfant était nourri 4 fois par jour, à heures fixes : 6h30, 10h30, 14h30 et 18h30.

Au départ, les repas étaient pris à l'intérieur du CREN, puis lorsque les mères savaient se débrouiller seules, elles pouvaient nourrir leurs enfants à la maison.

Le poids ainsi que les trois indices anthropométriques ont été mesurés tous les jours, pendant toute la durée de l'étude, de façon à mesurer l'évolution de l'état nutritionnel des enfants.

Pour l'interprétation des résultats, les comparaisons ont été réalisées par analyse statistique et calcul des Z-scores (médiane \pm déviation standard) pour chaque indice. Ces calculs ont été effectués d'après les références du National Center for Health Statistics (NCHS).

➤ Résultats obtenus

Le nombre total des enfants avait été déterminé avant le début de l'étude, de façon à ce que l'échantillon soit représentatif. Les enfants des groupes 1, 2 et 3 ont été répartis de façon aléatoire (tableau XXV). Les résultats sont présentés dans le tableau XXVI.

Par ailleurs, il est important de signaler que la compliance au traitement a été excellente : aucun enfant n'a abandonné l'étude et les mères rapportent qu'elles n'ont pas eu de difficulté pour leur faire accepter les préparations.

La comparaison des indices anthropométriques P/T et P/A, entre le début et la fin de l'étude (tableau XXVI), montre que l'état nutritionnel s'est amélioré chez tous les enfants, mais de façon encore plus nette chez ceux nourris par la spiruline + Misola (groupe 3).

On constate également que l'ajout de 10 g de spiruline au Misola permet une meilleure récupération nutritionnelle par rapport à l'utilisation de la spiruline ou du Misola seuls ; la correction de l'insuffisance pondérale s'est montrée plus rapide.

Au terme des 8 semaines du programme de réhabilitation alimentaire, les prises de poids selon les groupes d'enfants ont été les suivantes :

- 20 g par jour pour les enfants du groupe 1 ;
- 25 g par jour pour les enfants du groupe 2 ;
- 34 g par jour pour les enfants du groupe 3 ;
- 15 g par jour pour les enfants du groupe 4 (groupe témoin).

Ses résultats s'expliquent par le fait que les enfants du groupe 3 sont ceux qui ont reçu l'alimentation apportant le plus d'énergie (767 ± 5 kcal par jour) et le plus de protéines (environ 37 g par jour).

Une étude antérieure réalisée par Branger et al. [273] sur des enfants malnutris au Burkina Faso, ne montrait pas d'amélioration significative quant à l'ajout de 5 g de spiruline aux mets traditionnels ou au Misola. Les auteurs de cette étude réalisée en 2002 ont conclu que leurs recherches en mentionnant que la dose de spiruline était peut-être trop faible pour obtenir des résultats significatifs.

Il en est de même pour l'étude réalisée à Dakar en 1995 par Sall et al. [274] : leurs résultats montraient un gain de poids moindre avec pourtant la même dose de spiruline (10 g par jour) ; mais dans ce cas, la durée de l'étude était réduite de moitié (30 jours) par rapport à celle menée en 2003 par Simpore et al. (8 semaines) [275].

	Groupe 1 (Misola seul)	Groupe 2 (spiruline + mets traditionnels)	Groupe 3 (spiruline + Misola)	Groupe 4 (mets traditionnels)	analyse variance
Age (mois)	15,39 ± 8,3	14,96 ± 5,9	13,86 ± 8,5	15,19 ± 4,35	p = NS
Taille (cm)	67,00 ± 8,3	69,84 ± 5,8	69,06 ± 8,5	68,24 ± 4,5	p < 0,01
Périmètre brachial (cm)	11,17 ± 1,2	10,40 ± 1,0	11,20 ± 1,2	10,37 ± 1,0	p < 0,001
Poids (kg)	6,12 ± 1,4	5,98 ± 1,1	5,99 ± 1,5	6,10 ± 1,2	p = NS
T/A (z-score)	-3,93 ± 5,3	-2,64 ± 2,1	-3,35 ± 5,3	-3,23 ± 1,5	p = 0,057
P/T (z-score)	-1,73 ± 2,51	-2,88 ± 0,95	-3,05 ± 0,75	-2,32 ± 1,02	p < 0,001
P/A (z-score)	-4,01 ± 1,0	-3,88 ± 1,0	-4,38 ± 0,91	-3,99 ± 0,90	p < 0,001
protéines (g/j)	27,1 ± 1,7	27,8 ± 1,6	33,3 ± 1,2	22,1 ± 1,3	p < 0,001

T/A = taille/âge ; P/T = poids/taille ; P/A = poids/âge ; NS = non significatif

Tableau XXV : Indices anthropométriques mesurés chez les 550 enfants, au début de l'étude (J₀)

	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Groupe 4
P/T (z-score) à J ₀	-1,73 ± 2,51	-2,88 ± 0,95	-3,05 ± 0,75	-2,32 ± 1,02
P/T (z-score) à J ₅₆	-1,14 ± 2,64	-1,80 ± 1,53	-1,18 ± 1,63	-2,00 ± 0,99
Student T test	p = 0,035	p < 0,001	p < 0,001	p = 0,065
taux de progression	34,14%	37,50%	62,90%	17,35%
P/A (z-score) à J ₀	-4,01 ± 1,0	-3,88 ± 1,0	-4,38 ± 0,9	-3,99 ± 0,90
P/A (z-score) à J ₅₆	-2,95 ± 1,12	-3,10 ± 1,14	-2,71 ± 1,17	-3,45 ± 1,0
Student T test	p < 0,001	p < 0,001	p < 0,001	p = 0,013
taux de progression	26%	20%	38%	14%

Tableau XXVI : Evolution de l'état nutritionnel des enfants entre le début (J₀) et à la fin de l'étude (J₅₆)

➤ Conclusion

Les résultats de cette étude suggèrent que la spiruline constitue une solution pour accélérer la récupération nutritionnelle des enfants malnutris. Dans un contexte de faible consommation en protéines (10 g par jour en Afrique contre 29 g en Amérique latine et 63 g dans les pays industrialisés), l'intégration de la spiruline (10 g) à l'alimentation traditionnelle ou au Misola, semble permettre la récupération nutritionnelle des enfants malnutris et la couverture de leurs besoins en micro-nutriments.

Ils ont donc encouragé le CMSC de Ouagadougou à poursuivre la culture de spiruline, dans le but d'utiliser ses composants en complément de l'alimentation des enfants admis au centre.

Les auteurs de l'étude insistent par ailleurs sur le fait que la participation des familles d'enfants atteints de malnutrition et de toute la communauté, est essentielle pour réussir à diminuer la prévalence de cette affection dans les pays d'Afrique.

6.2 Evaluation de l'efficacité de la supplémentation en spiruline auprès d'enfants atteints de malnutrition sévère, au Niger [276]

➤ Contexte de l'étude

Le Niger est considéré comme le pays le plus pauvre du monde. Le rapport 2005 du PNUD le classe, en effet, au dernier rang de l'échelle mondiale de développement humain [277]. Son économie repose essentiellement sur l'agriculture et l'élevage qui, à eux seuls, contribuaient pour 45 % du produit intérieur brut (PIB) en 1995. Malheureusement, situé de part et d'autre du Sahel et du Sahara, le pays est en proie, à un processus de désertification qui déstabilise son potentiel agricole et l'élevage. Ces deux mamelles de l'économie nigérienne étant de plus tributaires de nombreux aléas climatiques, le pays s'est donc lourdement endetté.

La situation du pays en 2005 est la suivante [277] :

- le taux de mortalité des moins de 5 ans est égal à 256 ‰ ;
- le taux de mortalité infantile est égal à 150 ‰ ;
- 13 % des nouveaux-nés présentent une insuffisance pondérale à la naissance ;
- 40 % des enfants de moins de 5 ans souffrent d'insuffisance pondérale modérée à grave ;
- 14 % des enfants de moins de 5 ans souffrent d'insuffisance pondérale grave ;
- 14 % des enfants de moins de 5 ans souffrent d'émaciation modérée à grave ;
- 40 % des enfants de moins de 5 ans souffrent d'un retard de croissance modéré à grave ;
- un enfant meurt toutes les 4 minutes des conséquences de la malnutrition ;
- l'espérance de vie à la naissance est de 45 ans ;
- 41 % de la population n'a pas d'accès durable à l'eau potable ;
- 42 % de la population totale souffre de malnutrition ;
- 61 % de la population vit avec moins de 1\$ par jour, 85 % vit avec moins de 2\$ par jour ;
- la couverture sanitaire est faible (47,35 %) et inégalement répartie, les zones rurales étant particulièrement défavorisées.

Un étudiant nigérien, dans le cadre de sa thèse pour l'obtention du diplôme de docteur en médecine, a organisé en 2002, une étude dans le cadre de la lutte contre la malnutrition dans son pays. A l'époque où il a commencé son travail de recherche, les chiffres de la malnutrition dans le pays étaient les suivants : concernant les enfants de moins de 5 ans, 16 % souffraient de sous-nutrition aiguë (indice P/T < -2ET) et 32 % présentaient un retard de croissance (indice T/A < -ET). Par ailleurs, 28,6 % des adultes présentaient une déficience chronique en énergie (indice P/T < 18,5).

Chaque année, environ 3 000 enfants sont admis au service de pédiatrie A de l'hôpital national de Niamey (capitale du Niger).

En 2002, sur 2 829 admissions, la MPE a occupé le troisième rang des motifs d'hospitalisation, avec 425 entrées [276].

➤ Objectifs

Le but de cette étude était de tester l'efficacité de la récupération nutritionnelle chez des enfants en état de malnutrition sévère, par adjonction de spiruline au régime traditionnel à base de bouillie de mil ou autre céréale.

De façon plus spécifique, l'étudiant nigérien, souhaitait également évaluer la rapidité et l'importance de la normalisation des signes biologiques et des signes de récupération nutritionnelle.

➤ Méthodologie

L'étude prospective longitudinale portait sur 56 enfants présentant une MPE sévère, admis dans le service de pédiatrie A de l'hôpital national de Niamey. L'auteur de l'étude a choisi un hôpital comme lieu d'étude car, selon lui, les malades graves hospitalisés sont les seuls que l'on peut suivre quotidiennement sur le plan médical et dont on peut contrôler l'alimentation.

L'étude s'est déroulée dans ce service hospitalier, sur une période de 11 mois (du 6 juin 2002 au 10 mai 2003).

Les critères d'inclusion dans l'étude étaient : tous les enfants âgés de 6 à 24 mois révolus présentant une MPE ; à noter que sont considérés comme malnutris sévères, les enfants dont le rapport P/T (indice anthropométrique poids pour taille), exprimé en score d'écart type (ET), est inférieur ou égal à $-3ET$.

La répartition des enfants selon leur forme de MPE était la suivante :

- 45 cas de marasme
- 3 cas de kwashiorkor
- 8 cas de forme mixte.

Par ailleurs, à l'admission tous les enfants présentaient des signes ou des pathologies associées à leur malnutrition. Ainsi, plus de 3 enfants sur 4 étaient fébriles et anorexiques à l'entrée tandis que plus de 1 sur 2 présentaient une gastro-entérite (vomissements + diarrhée) et des lésions cutanéophanéariennes.

Concernant le déroulement de l'étude, chaque enfant recevait 10 g de spiruline en granulés, repartis en 2 prises journalières, et mélangés à la bouillie de mil pendant 14 jours. Il faut préciser qu'aucun enfant n'a reçu d'alimentation hypercalorique durant son séjour à l'hôpital ; l'alimentation a été uniquement constituée de la nourriture habituelle supplémentée en spiruline.

Le suivi clinique des enfants a été standardisé grâce à une fiche d'observation où sont notés les signes les plus courants de la MPE sévère, ainsi que leur durée d'évolution.

Le poids était relevé quotidiennement, le matin.

Un bilan para clinique a été réalisé à l'entrée et à la sortie de l'étude (soit 2 semaines après l'admission). Il incluait à la fois des examens systématiques (hémogramme, protéines totales sériques, albumine et préalbumine sériques) et des examens guidés par l'orientation diagnostique.

De plus, chaque enfant a été traité médicalement en fonction des signes cliniques présentés et des résultats des examens complémentaires.

➤ Résultats obtenus

Les tableaux XXVII à XXXIV exposent l'évolution des différents paramètres mesurés chez les enfants, entre le début et la fin de l'étude.

	J0	J14
protidémie moyenne (g/L)	55,438	73,209

Tableau XXVII : Evolution moyenne de la protidémie entre le début (J0) et la fin de l'étude (J14)

La progression observée pour la protidémie est de 32 %.

âge (mois) protidémie (g/L)	6 à 12	13 à 18	19 à 24
J0	55,252	55,411	56,091
J14	74,715	71,908	76,570
progression (en %)	35,225	29,772	36,510

Tableau XXVIII : Evolution moyenne de la protidémie en fonction de l'âge

Toutes les tranches d'âge montrent une progression similaire, la meilleure étant observée pour les 6-12 mois et les 19-24 mois.

Cependant si l'on tient compte de la pathologie associée, la protidémie ne progresse pas forcément. En effet, l'étude montre que la diarrhée semble influencer négativement l'évolution de la protidémie puisque celle-ci régresse de près 9 % chez les enfants diarrhéiques. Chez les enfants qui n'ont pas présenté de diarrhée pendant la période de l'étude, la progression constatée est de 36,43 %.

Deux raisons permettent d'expliquer ces faits :

- les enfants malnutris diarrhéiques prélevés à leur admission (avant tout traitement) présentaient très probablement une déshydratation comme cela est habituel. Ainsi le premier taux de protéine se trouve anormalement élevé du fait de l'hémoconcentration concomitante. Ce taux élevé s'abaisse ensuite après la réhydratation, et l'élévation induite par la consommation spiruline est insuffisante pour positiver le gain en protéine.
- la diarrhée peut aussi induire un phénomène de malabsorption. Il est bien connu que dans les cas de malnutrition sévère avec diarrhée persistante, une grande partie des aliments ne sont pas absorbés, du fait de la destruction des villosités intestinales.

Tableau XXIX : Evolution moyenne de l'albuminémie entre J0 et J14

	J0	J14
albuminémie moyenne (g/L)	26,850	35,085

On observe une progression de 30 % avec la supplémentation en spiruline.

Tableau XXX : Evolution moyenne de l'albuminémie en fonction de l'âge

âge (mois) albuminémie (g/L)	6 à 12	13 à 18	19 à 24
J0	27,667	26,710	25,259
J14	35,104	33,212	36,552
progression (en %)	26,880	24,340	44,708

L'évolution de l'albuminémie est particulièrement importante pour la tranche des 19-24 mois.

A noter que cette évolution présente une différence significative selon que les enfants ont présenté ou non une diarrhée au cours de l'étude.

Tableau XXXI : Evolution moyenne du taux de préalbumine sérique entre J0 et J14

	J0	J14
préalbuminémie moyenne (g/L)	0,16	0,256

Cette protéine est abaissée au départ chez tous les enfants. Après 14 jours de supplémentation en spiruline, elle se normalise grâce à une progression de 60 %.

Tableau XXXII : Evolution moyenne du taux de préalbumine sérique en fonction de la forme de MPE

taux préalbumine (g/L) \ forme MPE	marasme	kwashiorkor et forme mixte
J0	0,169	0,151
J14	0,254	0,270
progression (en %)	50,29	78,80

On constate que la progression est nettement plus élevée dans la forme oedémateuse que dans les formes à composante marasmique majeure.

Sur le plan de l'évolution moyenne de la préalbuminémie en fonction de l'âge, l'étude montre que les trois tranches d'âge progressent de manière importante, avec cependant une bien meilleure progression dans celle des 6-12 mois.

Par ailleurs, là encore, la diarrhée semble influencer très négativement l'évolution du taux de préalbumine : en effet, celui-ci a augmenté de plus de 65 % chez les enfants qui n'ont pas fait de diarrhée alors qu'il a régressé d'environ 10 % chez ceux qui en ont fait au cours de l'étude.

Tableau XXXIII : Evolution moyenne du taux d'hémoglobine entre J0 et J14

	J0	J14
hémoglobine moyenne (g/dL)	8,567	8,954

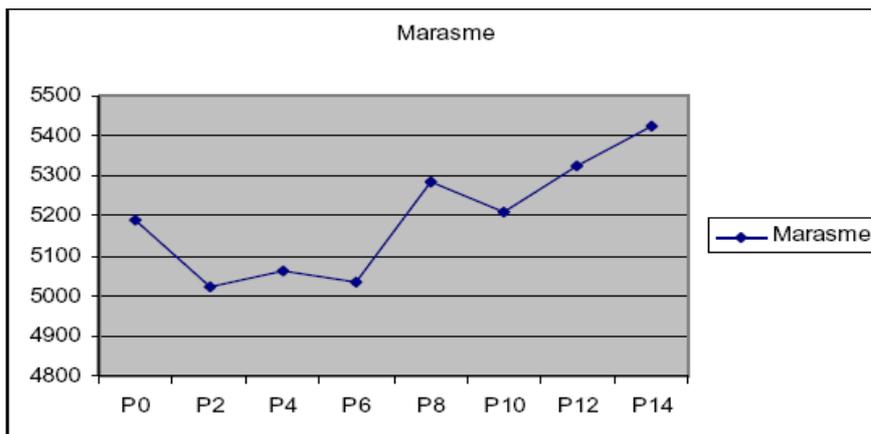
A l'admission, les enfants présentaient tous un taux moyen d'hémoglobine bas. La progression, après 14 jours de supplémentation en spiruline, est de 4,5 %.

Tableau XXXIV : Evolution moyenne du taux d'hémoglobine en fonction de l'âge

âge (mois) hémoglobine (g/dL)	6 à 12	13 à 18	19 à 24
J0	8,872	8,449	7,821
J14	9,166	8,410	9,030
progression (en %)	3,313	-0,46	15,458

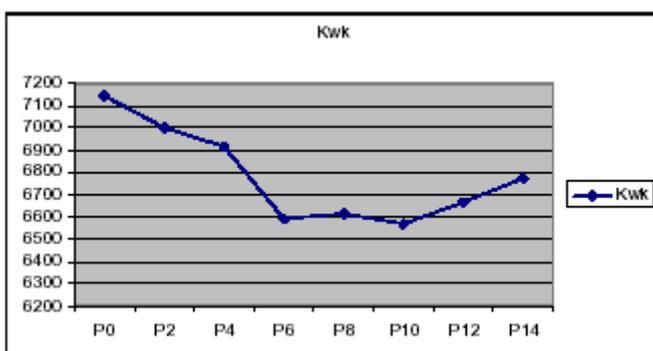
On constate que la progression du taux d'hémoglobine a été très bonne dans le groupe des 19-24 mois, mais nulle dans celui des 13-18 mois.

Les figures 74, 75 et 76 représentent les courbes pondérales des enfants selon la forme de MPE dont ils sont atteints ; l'axe des abscisses représente les jours de pesées (P0 correspond au poids des enfants au début de l'étude et P14, leur poids après 14 jours de supplémentation en spiruline) ; l'axe des ordonnées représente le poids des enfants exprimé en g.



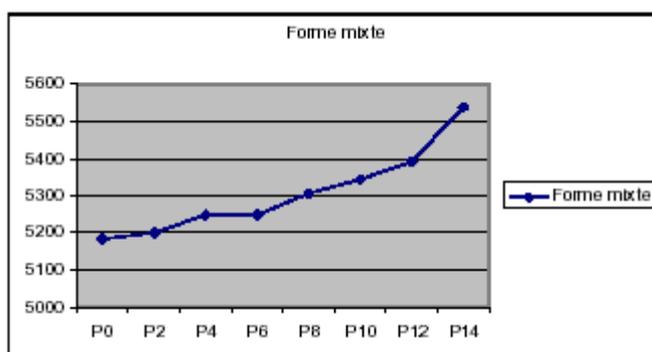
La courbe pondérale des enfants marasmiques montre initialement une légère chute du poids (les deux premiers jours), avant d'entreprendre une ascension lente.

Figure 74 : Evolution pondérale moyenne des enfants atteints de marasme, en fonction du temps [276]



La courbe pondérale des enfants atteints de kwashiorkor montre une chute progressive du poids pendant la première semaine (perte des oedèmes) suivie d'une courte stabilisation puis d'une remontée du poids (à partir du dixième jour).

Figure 75 : Evolution pondérale moyenne des enfants atteints de kwashiorkor, en fonction du temps [276]



Les enfants atteints de la forme mixte présentent une courbe pondérale dont l'ascension est lente mais très régulière.

Figure 76 : Evolution pondérale moyenne des enfants atteints de la forme mixte, en fonction du temps [276]

Globalement, quelle que soit la forme de malnutrition, on constate que l'évolution pondérale est toujours favorable à la fin de l'étude.

➤ Conclusions

Cette étude de l'effet de la spiruline chez des enfants sévèrement malnutris montre des réponses différentes en fonction des affections associées et des groupes d'âges. Certaines sont très appréciables comme la progression de la protidémie, de l'albuminémie et de la préalbumine chez les enfants non diarrhéiques. Dans ce cas, la spiruline semble donc parfaitement indiquée.

Le fait que l'évolution de ces mêmes paramètres soit plutôt négative en cas de diarrhée associée, assombrit un peu ce tableau optimiste. Cependant, il ne faut pas pour autant conclure que la spiruline ne constitue pas une bonne supplémentation alimentaire en cas de diarrhée. La durée d'observation (14 jours) est certainement trop courte pour cerner tous les contours de l'effet de sa supplémentation. En cas de diarrhée chez les sujets malnutris, il faut un certain temps pour que les villosités intestinales se reconstituent, de façon à favoriser de nouveau l'absorption des nutriments. Une chose est sûre : les éléments qui aident le mieux cette régénération sont tous contenus dans la spiruline, à savoir les protéines, les vitamines et les lipides.

6.3 Essai de réhabilitation nutritionnelle au Sénégal [274]

➤ Contexte de l'étude

Dans ce pays, la situation en 2005 est la suivante [278]:

- le taux de mortalité des moins de 5 ans est égal à 136 ‰ ;
- le taux de mortalité infantile est égal à 77 ‰ ;
- 18 % des nouveaux-nés présentent une insuffisance pondérale à la naissance ;
- 17 % des enfants de moins de 5 ans souffrent d'insuffisance pondérale modérée à grave ;
- 3 % des enfants de moins de 5 ans souffrent d'insuffisance pondérale grave ;
- 8 % des enfants de moins de 5 ans souffrent d'émaciation modérée à grave ;
- 16 % des enfants de moins de 5 ans souffrent d'un retard de croissance modéré à grave ;
- l'espérance de vie à la naissance est de 56 ans ;
- 72,7 % de la population a accès à l'eau potable ;
- la malnutrition, les diarrhées et les fièvres constituent les déterminants majeurs de la mortalité des enfants entre 0 et 5 ans.

A l'époque où l'étude a été réalisée, les formes graves de MPE (marasme et kwashiorkor) représentaient une préoccupation majeure du milieu hospitalier dakarais car elles constituaient plus de 30 % des hospitalisations avec une mortalité intra hospitalière de 10 à 20 %. La nécessité d'une amélioration de la prise en charge devenait indispensable. L'idée était donc de trouver des solutions appropriées pour une réhabilitation nutritionnelle au moindre coût.

➤ Objectif

Le but de cette étude était de tester l'effet de la spiruline sur la réhabilitation nutritionnelle d'enfants atteints de malnutrition sévère. La comparaison avec les résultats d'autres études utilisant d'autres produits pour la réhabilitation, devait permettre de voir quelle solution était la plus rapidement efficace.

➤ Méthode

L'étude s'est déroulée dans le service de Médecine Infantile du CHU de Dakar et au Centre de Récupération Nutritionnelle du dispensaire Saint-Martin de Rebeuss, du 13 Juin au 20 Décembre 1995.

Un échantillon de 59 enfants (dont 34 garçons et 25 filles) victimes de MPE grave, a été utilisé pour l'expérimentation ; leur répartition était la suivante :

- 17 cas de kwashiorkor
- 35 cas de marasme
- 7 cas de kwashiorkor marasmique.

L'âge moyen de ces enfants était de $19,11 \pm 6,43$ mois ; cet âge correspond à une période de grande vulnérabilité dans les PVD. A noter que plus de 70 % de ces enfants étaient issus d'un milieu rural ou des quartiers suburbains (transplantés de l'exode rural). Or, dans ces zones, il existe une augmentation du nombre de cas d'appauvrissement, un taux élevé d'analphabétisme, une mauvaise pratique du sevrage, ainsi qu'une hygiène individuelle et collective défectueuse [279].

Pour les besoins de l'étude, chaque enfant a reçu une dose journalière de 10 g de spiruline en poudre, répartie en deux prises journalières mélangée à la bouillie de céréales. Ceci pendant 30 jours en milieu hospitalier, suivis de 30 jours à domicile.

L'examen clinique a été standardisé à l'aide d'une fiche d'observation sur laquelle étaient notés l'état général, les troubles digestifs, les œdèmes, les lésions cutanéophanéariennes et les troubles psychiques. Une pesée de chaque enfant a été réalisée quotidiennement à l'aide d'une balance permettant une précision à 10 grammes près.

Le périmètre brachial a été évalué à J1, J8, J15, J30 et J60. La mesure de la taille a été réalisée à J1, J30 et J60. Les indices anthropométriques P/A (poids/âge), T/A (taille/âge) et P/T (poids/taille) ont été comparés aux normes NCHS (National Center for Health Statistics) et exprimés en Z-score. Concernant l'évaluation des paramètres biologiques, les examens ont été réalisés à J1, J8, J15, J30 et J60 ; diverses valeurs biologiques ont été mesurées : la Numération Formule Sanguine (NFS), les protéines sériques (préalbumine, la transférine, l'apolipoprotéine A1 et la protéine C réactive (CRP). A noter que la préalbumine et l'apolipoprotéine A1 représentent les meilleurs marqueurs sériques de l'état nutritionnel.

➤ Résultats

La spiruline a été mélangée à la bouillie ou à du lait. Avec son goût de poisson fumé, les enfants l'ont acceptée facilement et la tolérance a été jugée bonne car il n'y a pas eu de cas d'aggravation ou de survenue clinique de troubles digestifs au cours de la réalimentation, ni de phénomènes allergiques cutanés ou respiratoires.

Sur le plan clinique, 88,13 % des enfants présentaient à l'admission, une diarrhée traînante dont la résolution sous traitement s'est faite en moyenne en 5 à 6 jours. Quant aux œdèmes retrouvés chez 100 % des cas de kwashiorkor et 71,43 % des formes mixtes, leur fonte a été totale entre le cinquième et le huitième jour.

A noter que ces résultats sont nettement meilleurs que ceux obtenus en République Centrafricaine (délai de 10 à 15 jours) [280]. De même, dans une autre étude utilisant une poudre de têtes de crevettes, 31 % des enfants présentaient encore des œdèmes au-delà du dixième jour [281].

Les résultats obtenus pour l'étude menée à Dakar sont superposables à ceux obtenus avec le Suppletal® (aliment diététique hyperprotidique) [282].

Le poids moyen des enfants réhabilités était de $6,49 \pm 1,62$ kg à l'entrée ; à la sortie, c'est-à-dire après une durée d'hospitalisation de 30 jours, ce poids moyen est passé à $7,64 \pm 1,69$ kg ($p < 0,01$), soit un gain moyen de 50 g par jour.

Cette progression de poids s'avère supérieure à celle observée avec le Nesmida® (protéolysat de lactalbumine aujourd'hui retiré du commerce) et la poudre de têtes de crevettes [282]. Cependant, si on se réfère à l'ouvrage de JC. WATERLOW [283], le gain de poids acquis n'est pas suffisant puisqu'il n'atteint pas 10 à 20 g/kg/jour ; effectivement, dans l'étude de Dakar, le gain de poids observé n'est que de 7,64 g/kg/ jour.

Par ailleurs, le périmètre brachial a nettement augmenté, avec une différence significative ($p < 0,01$) au terme de l'hospitalisation ($10,74 \pm 1,40$ cm à l'entrée contre $12,51 \pm 1,39$ à la sortie). Ceci reflète une reconstitution partielle de la masse musculaire des enfants.

Les tableaux XXXV, XXXVI, XXXVII présentent l'évolution de divers paramètres mesurés chez les enfants. Les résultats sont exprimés en moyenne \pm déviation standard.

Le taux sanguin d'hémoglobine chez des enfants de l'âge de ceux de l'échantillon étant normalement compris entre 11 et 13 g pour 100 ml, le bilan hématologique indique que les enfants sont anémiés à l'entrée (tableau XXXVI).

Après la réhabilitation nutritionnelle, on peut constater que leur taux d'hémoglobine a augmenté de façon significative ($p < 0,05$).

Ces résultats, sur le plan hématologique sont meilleurs comparés à ceux obtenus lors des essais de réhabilitation avec le "rouye" (bouillie de mil complet) [284] ou le Nesmida® [281] ; ceci tend à confirmer la réelle efficacité de la spiruline, probablement grâce à sa richesse en fer biodisponible.

Tableau XXXV : Indices anthropométriques (P/A, T/A, P/T) selon le type de malnutrition constaté chez les enfants

	Indices anthropométriques								
	P/A (Z-score)			T/A (Z-score)			P/T (Z-score)		
	K	KM	M	K	KM	M	K	KM	M
J1	-3,11±1,05	-4,28±0,68	-4,53±0,72	-1,67±1,47	-1,89±1,97	-2,26±1,68	-2,66±1,24	-3,74±0,68	-4,11±0,91
J8	-3,37±0,84	-3,81±0,63	-4,10±0,72	-1,67±1,47	-1,89±1,97	-2,26±1,68	-3,01±1,00	-3,74±0,89	-3,53±0,91
J15	-3,11±0,79	-3,76±0,44	-3,76±0,81	-1,65±1,47	-1,89±1,97	-2,26±1,68	-2,68±0,97	-3,12±1,21	-3,07±0,84
J30	-2,69±0,95	-3,13±0,45	-3,49±0,92	-1,95±1,44	-2,07±1,78	-2,52±1,66	-1,95±0,96	-2,23±1,15	-2,25±0,99
J60	-2,55±0,86	-3,00±0,57	-3,29±1,09	-2,04±1,41	-2,32±1,86	-2,73±1,70	-1,52±1,02	-1,86±0,99	-2,14±1,05

P/A = Poids/Age T/A = Taille/Age P/T = Poids /Taille
 K = Kwashiorkor KM = Kwashiorkor marasmique M = Marasme

Tableau XXXVI : Evolution du taux d'hémoglobine

	Taux d'hémoglobine en g/dL				
	J1	J8	J15	J30	J60
décédés	8,30±1,41	7,90±1,52	8,06±1,51	—	—
sortis contre avis	7,40±2,85	5,96±2,68	8,40±0,00	—	—
réhabilités	7,20±1,01	6,65±1,03	6,76±1,90	7,42±1,30	8,10±2,12

Le seuil minimal de référence concernant la valeur de la préalbumine sérique chez les enfants étant de 60 mg/L, ceux de l'étude présentaient donc un taux initial très bas. Le tableau XXXVII indique que ce taux a ensuite évolué de manière très satisfaisante, dès le 8ème jour de réhabilitation.

A J30, la valeur atteinte montre même que le pourcentage de récupération est égal à 175,5 %.

Tableau XXXVII : Evolution du taux plasmatique de préalbumine

	Préalbumine en mg/L				
	J1	J8	J15	J30	J60
décédés	10±0,9	12±0,8	19±1,2	—	—
Sortis contre avis	8±1,6	11±0,8	9±0,00	—	—
réhabilités	8±0,3	15±1,1	20±1,5	19±1,8	18±0,46

En ce qui concerne l'apolipoprotéine A1, sa progression a également été significative : d'une valeur de $0,85 \pm 0,33$ g/L à l'entrée, elle atteint $1,17 \pm 0,38$ g/L à la sortie ; la valeur normale est de 1,2 g/L).

Les résultats du bilan protidique montrent donc une amélioration très nette des marqueurs de l'état nutritionnel.

➤ Conclusion de l'étude

Cette expérimentation menée chez des enfants sénégalais malnutris, a montré que la spiruline était bien acceptée, bien tolérée, qu'elle assurait une prise pondérale satisfaisante, ainsi qu'une normalisation des marqueurs de l'état nutritionnel.

A l'issue de leur étude, les chercheurs ont formulé la conclusion suivante : « avec un prix de revient compétitif, la spiruline pourrait être d'un grand intérêt dans la récupération et la prévention de la malnutrition protéino-énergétique ».

6.4 Etude sur les bénéfices nutritionnels de la spiruline, réalisée en Inde du sud [285]

➤ Contexte

L'Inde a connu une forte croissance économique au cours des dix dernières années, notamment dans le secteur de la technologie de l'information. Mais ces progrès n'ont pas profité à tous les habitants de manière égale. De fortes disparités se maintiennent, fondées sur la classe sociale, la caste, le sexe et la géographie. Le nouveau gouvernement de coalition de l'Alliance Progressive Unie, arrivé au pouvoir en mai 2004, a promis de privilégier le développement social dans le cadre de son "programme minimum commun national". Il doit s'efforcer d'éliminer certaines inégalités dans la société indienne, en réduisant la pauvreté, en augmentant le budget de l'éducation, en accélérant la prestation de services de santé et en améliorant la nutrition et la sécurité alimentaire.

En 2005, la situation est la suivante [286] :

- le taux de mortalité des moins de 5 ans est égal à 74 ‰ ;
- le taux de mortalité infantile est égal à 56 ‰ ;
- 30 ‰ des nouveaux-nés présentent une insuffisance pondérale à la naissance ;

- 47 % des enfants de moins de 5 ans souffrent d'insuffisance pondérale modérée à grave ;
- 18 % des enfants de moins de 5 ans souffrent d'insuffisance pondérale grave ;
- 16 % des enfants de moins de 5 ans souffrent d'émaciation modérée à grave ;
- 46 % des enfants de moins de 5 ans souffrent d'un retard de croissance modéré à grave ;
- l'espérance de vie à la naissance est de 64 ans ;
- l'anémie est une des principales causes de la mortalité des mères et de l'insuffisance pondérale des nourrissons à la naissance ;
- l'assainissement insuffisant est responsable de diarrhées, lesquelles constituent la deuxième cause de décès des enfants. Si l'accès à l'eau propre s'est amélioré, 122 millions de foyers n'ont toujours pas de toilettes.

➤ Objectif

L'essai clinique a été réalisé conjointement par l'association Antenna Technologies (cf. 9.1) et le Medical College of Madurai. Leur but était d'évaluer les effets de la spiruline sur des enfants âgés de 1 à 6 ans, atteints de malnutrition à des degrés divers.

➤ Méthodologie

Il s'agit d'une étude comparative cas-témoins menée sur un échantillon de 60 enfants hospitalisés dans le service de pédiatrie de l'hôpital Rajaji à Madurai. Parmi cet échantillon, 30 enfants ont reçu de la spiruline à la dose de 1g/j pendant toute la durée de l'étude. Les autres n'ayant reçu qu'un placebo, ont constitué le groupe-témoin.

L'étude a duré 6 semaines.

Les paramètres mesurés, au départ puis chaque semaine jusqu'à la fin de l'étude, étaient les suivants : poids, taux d'hémoglobine, protéines sériques totales, fer plasmatique, ferritine et vitamine A.

➤ Résultats obtenus

Les résultats (tableau XXXVIII) ont été présentés lors du Congrès Mondial de Nutrition (New Delhi, 1999) ; il en ressort que :

- la protidémie a baissé de façon significative dans le groupe témoin ($p < 0,001$) alors qu'elle est passée de $53,38 \pm 10,6$ g/L à 103 ± 13 g/L chez les enfants recevant de la spiruline ; cela correspond à une progression d'environ 91 % ($p < 0,001$) ;
- l'hémoglobinémie est passée de $9,7 \pm 1,5$ g/dl à $10,3 \pm 1,3$ chez les enfants ayant reçu de la spiruline, soit une progression d'environ 61 % ($p < 0,001$).

Tableau XXXVIII : Pourcentage des enfants dont l'état nutritionnel s'est amélioré de façon significative, en fonction des différents paramètres cités. [285]

Paramètres mesurés	Groupe des enfants ayant reçu de la spiruline	Groupe témoin n'ayant pas reçu de spiruline
Poids	63,33 %	43,00 %
Taux d'hémoglobine	93,33 %	23,33 %
Protéines sériques totales	93,33 %	16,66 %
Fer plasmatique	63,33 %	40,00 %
Ferritine	93,33 %	16,66 %
Vitamine A	90,00 %	26,06 %

A la lecture du tableau XXXVIII, on constate également que les protéines apportées par la spiruline permettent une augmentation du taux global des protéines sériques. La consommation de spiruline a aussi permis d'améliorer de façon très nette les constantes biologiques en rapport avec le fer, ainsi que le niveau de vitamine A des enfants.

➤ Conclusion

Au vu des résultats obtenus après 6 semaines de supplémentation en spiruline (1 g/j), on peut supposer que ses effets bénéfiques sur une période plus longue seraient encore meilleurs.

Toutes les études qui viennent d'être présentées font apparaître que la spiruline pourrait constituer une méthode efficace de prévention des déficiences nutritionnelles touchant les enfants des PVD, dans le sens où elle les aiderait à parvenir à une croissance et un potentiel optimaux.

D'autres études cliniques ont par ailleurs démontré qu'une prise quotidienne de 10 g de spiruline, ajoutés à une base suffisante en calories et en protéines, permettait une récupération complète en quelques semaines [288]. Voici quelques précisions succinctes les concernant.

6.5 Etude menée en Chine

A l'hôpital pour enfants de Nanjing (province de Jiangxi), une étude a consisté à donner à ces enfants sans appétit, diarrhéiques ou constipés, un mélange de spiruline et d'orge germé grillé. Lors de la 4^{ème} conférence internationale d'algologie appliquée, à Villeneuve d'Ascq en 1987, le professeur Miao Jian Ren de l'académie des sciences agricoles, a annoncé les résultats de cette étude ; son commentaire en guise de conclusion a été : « cette algue bleue est un réel aliment de santé pour les enfants » [5].

6.6 Etudes menées au Zaïre

- o Patricia Bucaille, à l'occasion de sa thèse de doctorat en médecine, a mené une étude en 1990, sur la récupération nutritionnelle avec la spiruline, à l'Hôpital Général de Référence de Kabinda. Son étude a porté sur 28 enfants atteints de MPE sévère admis dans cet hôpital. La spiruline a été administrée sur une période de 7 à 11 mois, à raison de 10 g par jour, incorporée à des biscuits au manioc [287].

Il est important de souligner que 26 des enfants avaient une ou plusieurs maladies associées à leur MPE : on dénombrait en effet 5 enfants contaminés par le VIH, 5 cas de tuberculose, 3 cas de rougeole, 10 cas de paludisme, 10 cas de gale, 3 cas de bronchite, 3 cas d'ankylostomiase et 1 cas d'amibiase.

Les résultats obtenus ont été très bons : au cours du traitement, l'état de la moitié des enfants a été amélioré tant au niveau biochimique qu'au niveau clinique. A l'issue de l'étude, l'albuminémie et le score de Mac Laren, utilisés comme indicateurs de l'évolution de l'état nutritionnel, ont objectivement montré une nette amélioration chez tous les enfants. Des tests ont également montré une récupération sur le plan comportemental. Le gain moyen hebdomadaire en albumine a été estimé à 2,55 g/L.

A noter qu'initialement, l'étude portait sur des enfants âgés de 1 à 5 ans ; mais, pour des raisons éthiques, il a fallu l'élargir de façon à englober des enfants plus âgés, fort mal en point, qui venaient d'eux-mêmes réclamer leur part de "petits gâteaux verts".

Le personnel de l'hôpital, impressionné par les résultats obtenus, a décidé dans la foulée de réunir des fonds nécessaires à la mise en route d'une unité de production, afin de pouvoir disposer de spiruline pour ses patients.

Pendant l'étude, 5 enfants sont décédés (dont 3 contaminés par le VIH) et 4 ne se sont pas présentés à la dernière visite de contrôle.

En considérant les énormes difficultés rencontrées pour mener des tels essais (enfants gravement malades et capacités très limitées des infrastructures de l'hôpital rural de Kabinda), les résultats obtenus sont très encourageants sur le plan de la reconnaissance des bénéfices de la spiruline.

A l'époque (1990), Patricia Bucaille concluait son travail en écrivant : « D'autres études menées de façon plus stricte, sur une population plus large et sur une durée plus longue, seraient souhaitables pour compléter les connaissances et les constatations cliniques actuelles, trop peu nombreuses dans la littérature » [287]. Certes des recherches ont été menées depuis, mais la spiruline n'a pas encore décroché la reconnaissance qu'elle mérite (sans doute), quant à ses bénéfices dans le combat contre la MPE.

- o En décembre 1995, le docteur Kalenga (Fondation Mutundu à Lubumbashi), a mené une étude sur 20 enfants âgés de 2 à 13 ans, atteints de malnutrition sévère [5]. Ces enfants ont reçu 10g de spiruline par jour en complément de feuilles de manioc cuites, de riz, de boukari ou de maïs cuit.

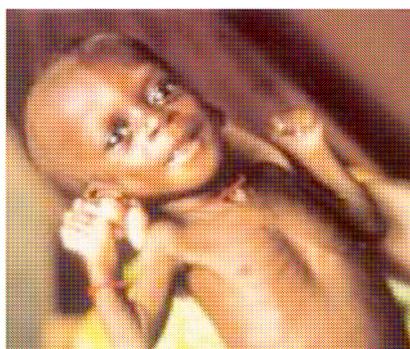
Après 3 mois de ce traitement, les gains de poids constatés ont été les suivants :

- 80 % pour 7 enfants ;
- 70 % pour 5 enfants ;
- 40 % pour 6 enfants ;
- 20 % pour 2 enfants.

Par ailleurs, 13 enfants présentaient une anémie avancée (taux d'hémoglobine compris entre 5 et 7 g/dL). Après les 3 mois d'alimentation enrichie en spiruline, le taux d'hémoglobine a connu une progression de 90 % chez 10 enfants, de 60 % chez 4 enfants et de 50 % chez 2 autres cas. Pour les cas restants, l'hémoglobinémie s'est normalisée.

6.7 Etude menée au Togo

Dans le village de Farendé, une étude clinique a été conduite en 1989 sur les enfants atteints de malnutrition. C'est à cet endroit que Ripley Fox a implanté l'un des premiers circuits de culture intégrée. Les mères accompagnaient leurs enfants au centre de soin où ils recevaient quotidiennement, de la part d'une infirmière, 10 g de spiruline en complément de leur alimentation habituelle [5]. Cette dose de spiruline, mélangée avec du mil, a entraîné des résultats remarquables, comme en témoignent les photographies des figures 77 et 78. Les enfants, après l'effet de surprise lié à la couleur verte prononcée de la spiruline, l'ont finalement bien acceptée. Au bout d'une semaine, les premiers signes d'amélioration clinique et le gain de poids étaient déjà visibles.



Enfant Marasmique à Farendé, Togo

Photo : JP Monnier



Le même enfant, 3 mois après, ayant reçu 10g de spiruline par jour dans une boulette de mil

Photo : JP Monnier

Figure 77 : Photographie d'un petit garçon du village de Farendé ayant pu bénéficier du programme de supplémentation en spiruline [181]



Figure 78 : Photographie d'une fillette avant et après 3 mois de supplémentation en spiruline. © 2001

6.8 Etude menée au Vietnam

Le centre de nutrition infantile d'Ho Chi Minh ville a élaboré des formules d'aliments de supplémentation pour lesquels la teneur en spiruline représentait 5 % du poids total. Il a ensuite procédé à des essais d'alimentation sur une cinquantaine d'enfants issus de deux crèches de la ville. Les résultats ont révélé une bonne acceptabilité du produit, avec un effet favorable sur le plan nutritionnel, comparable à celui de 100 g de soyamine (Programme Alimentaire Mondial), sous un volume nettement plus restreint [5].

En conclusion, toutes ces études montrent de façon évidente que la consommation quotidienne de 10 g de spiruline en complément de l'alimentation habituelle, peut être d'une grande utilité dans les programmes de lutte contre la malnutrition. Certes, à elle seule, elle ne constitue pas une solution unique, mais elle peut certainement contribuer efficacement à améliorer la stratégie de lutte dans les PVD.

7. Problèmes rencontrés par les initiateurs de projets d'exploitation de spiruline dans ces pays

La spiruline, en attendant d'avoir conquis les principales organisations de santé internationales et le monde scientifique souvent sceptiques, n'en a pas moins sur le terrain de très nombreux adeptes : organisations de santé locales, congrégations religieuses, centres de réhabilitation nutritionnelle, médecins et infirmiers ayant pu se rendre à l'évidence du « plus » apporté par la spiruline.

Nombreuses sont, par conséquent, les ONG petites ou moyennes souhaitant implanter des cultures locales.

Or, il se trouve que 95 % des projets d'implantation dans les PVD ne voient pas le jour. De plus, parmi les 5 % restant, 1/3 périssent, 1/3 vivent et 1/3 se développent [289].

Quelles sont les raisons de tant d'échecs ?

La production locale de spiruline est à la fois plus complexe et plus longue que les projets humanitaires couramment pratiqués par les ONG (constructions d'école, de puits, dons de matériels ou de médicaments...). Ceci s'explique notamment par le fait qu'elle fait appel à des connaissances diverses : techniques, biologiques, commerciales, gestion des ressources humaines et gestion financière [289].

Par ailleurs, l'expérience montre que l'effort le plus important se situe après la construction de la ferme. Or, beaucoup d'ONG sous-estiment le suivi de l'exploitation et se trouvent souvent contraintes à poursuivre un projet devenu trop lourd pour elles. En effet, nombre d'entre elles concentrent leurs efforts en amont des obstacles et, lorsque les réelles difficultés apparaissent, elles ne s'y sont pas préparées.

7.1 Première difficulté majeure : la maîtrise de la culture

Les techniques de culture de la spiruline sont aujourd'hui bien connues des spécialistes, mais il est rare qu'une ONG, lorsqu'elle débute, en ait un à sa disposition. Pourtant, force est de constater que cette culture est un art relativement complexe pour le commun des mortels.

Parmi les problèmes les plus fréquemment posés, on peut citer l'apparition des spirulines droites, les spirulines fragmentées, le jaunissement plus ou moins rapide des cultures, les difficultés de filtration et/ou de pressage, l'apparition de goût ou d'odeur désagréable, les éventuelles contaminations par d'autres algues, etc.

Lorsqu'on débute, la culture est difficile à maîtriser car elle dépend de nombreux facteurs croisés (température, ensoleillement, nourriture, agitation, pH...).

En outre, afin de pouvoir se faire conseiller à distance par un connaisseur, il faut déjà avoir acquis un certain niveau de connaissance et d'expérience, de façon à lui formuler correctement la difficulté rencontrée.

A cela, on peut aussi ajouter que le matériel cédé par l'ONG est parfois mal adapté ou rapidement mis hors service sur le terrain : pH mètres en panne ou mal utilisés, solutions étalons et kits d'analyse périmés...La mise en évidence des causes est alors plus difficile [290].

L'apparente facilité des projets d'exploitation provient du fait que le démarrage d'une culture de spiruline ne pose généralement pas de problème : la souche et le milieu de culture sont neufs, les conditions de développement sont optimales.

Cette période favorable, de quelques semaines à quelques mois, correspond généralement à la période de présence des représentants de l'ONG sur place. Ceux-ci repartent alors avec le sentiment de la "mission accomplie".

Malheureusement, les premières difficultés surviennent le plus souvent après le départ de l'ONG et elles sont majorées par trois facteurs [290]:

- l'incapacité de l'acteur local, encore peu expérimenté, non seulement à trouver la cause, mais aussi à décrire le problème de culture rencontré ;
- les difficultés et délais de communication : barrière de la langue, nécessité absolue de liaisons téléphoniques car le producteur local et le spécialiste sont souvent très loin l'un de l'autre ;
- l'évolution très rapide de la spiruline, laquelle est tout autant capable d'une duplication toutes les 7 heures que d'une mort subite.

7.2 Deuxième difficulté majeure : la formation du personnel local

Lorsque la maîtrise de la culture par l'ONG est acquise, il s'agit ensuite de transmettre ce **savoir** à une petite d'exploitation locale. Rappelons qu'il est quasiment indispensable de disposer sur place d'un partenaire sérieux et organisé, et de certaines facilités (eau, électricité et téléphone). Le recul permet de constater que la grande majorité des implantations réussies en Afrique (durée de vie prolongée au-delà de 5 ans), sont pour l'instant le fait de congrégations religieuses locales stables et organisées [290].

Le transfert du savoir est relativement rapide : il faut compter entre quelques heures et quelques jours selon les moyens pédagogiques utilisés et l'entendement des étudiants.

En revanche, l'acquisition du **savoir faire** nécessite du temps et de la patience car elle est le fruit de l'expérience.

D'autre part, toujours dans le cadre de la formation, la maîtrise de la gestion d'une unité de production de spiruline, quelle ait 50 ou 5 000 m², est une étape tout aussi longue à acquérir pour l'exploitant. L'expérience montre qu'en Afrique, cet aspect est particulièrement délicat à aborder, tant sont absentes des préoccupations locales les notions d'organisation, de discipline, d'anticipation, de procédures, de contrat, de comptabilité, pourtant piliers de toute entreprise [290]. En réalité, la notion d'entreprise est pratiquement absente du tempérament africain, encore prisonnier de sa tradition et de ses racines. Il est ainsi fréquent de constater des ruptures de stock d'intrants, des négligences dans la comptabilité et une surveillance irrégulière des cultures.

Quelques années de patience et de conseils sont nécessaires pour que, peu à peu, chacun au niveau de l'exploitation se sente responsable et soit efficace. Au final, la survie d'une exploitation passe par la professionnalisation progressive de l'équipe en place. Même si l'ONG démarre sur une base louable alter mondialiste, force lui sera de reconnaître qu'elle n'échappera pas aux principes universels de l'entreprise. Bien entendu, ces notions ne doivent pas empêcher pour autant le respect des principes humanitaires et le travail dans la bonne humeur.

7.3 Troisième difficulté majeure : la pérennité de l'exploitation

La construction d'une ferme de culture a un coût, mais l'exploiter sur le long terme coûte encore beaucoup plus cher. Or, l'ONG et le partenaire local ont tendance à oublier ce point [289] [290].

Dans le cadre de **petites installations (quelques dizaines de m²)**, c'est le plus souvent l'ONG qui se concentre sur la construction et le démarrage de la ferme ; les aspects financiers, sont confiés au partenaire local : congrégation religieuse ou associations.

Pour ces micro-installations qui produisent quelques kilogrammes de spiruline par mois, les coûts mensuels (en prenant en compte tous les salaires, les intrants, l'ensachage, les réparations et remplacements de matériel, l'eau, le téléphone et l'électricité), étaient de l'ordre de 80 à 150 € en 2006 (ordre de grandeur pour l'Afrique), soit entre 50 000 et 100 000 F CFA. Ces coûts, même modérés, constituent une charge supplémentaire pour le financeur, dont il n'a apparemment pas souvent conscience à l'origine.

Ainsi, les coûts d'exploitation dépassent en quelques années le coût de réalisation, et ceci d'autant plus rapidement que l'unité de production est petite. Au bout du compte, produire de la spiruline sur de petites installations revient toujours plus cher que d'importer de la spiruline industrielle (environ 15 €/le kg). En pratique, les petites unités de production de spiruline en milieu villageois ou par le biais d'une association locale humanitaire, en fournissent au maximum quelques kilogrammes par mois et offrent un impact humanitaire limité au regard des efforts fournis.

Néanmoins, l'expérience montre qu'il est souvent intéressant de commencer par ces petites installations, pour « se faire la main », et aussi parce que les coûts d'investissements sont faibles (environ 10 000 €). De plus, ce type d'installation a l'avantage de faire connaître la technique de culture de la spiruline, et de permettre la distribution de spiruline fraîche, plus efficace et plus facilement tolérée. On crée ainsi dans les PVD, des "noyaux d'intérêt" de la spiruline, propices au démarrage dans un deuxième temps, de projets plus grands, à objectif d'autofinancement [290].

Dans le cadre des **exploitations artisanales de quelques centaines de m²**, c'est effectivement le principe de l'autofinancement qui est pratiqué. Il consiste à financer les coûts d'exploitation en commercialisant (sur place) une partie de la production, la partie restante étant destinée à la distribution sociale pour les plus démunis.

Cette part sociale que peut fournir une exploitation est fonction du prix de revient de la production et du prix de vente de la partie commercialisée, selon la relation suivante [290] :

$$Ps \cdot S + Pv \cdot C = Pr (100 + \text{marge d'exploitation})$$

d'où

$$S = \frac{Pv \cdot 100 - Pr (100 + \text{marge brute d'exploitation})}{Pv - Ps}$$

avec S = pourcentage de la production distribuée socialement

C = pourcentage de la production commercialisée

Pr = prix de revient au kilo de la production totale

Pv = prix de vente de la production commercialisée

Ps = prix de vente social

le signe \cdot correspond à une multiplication

Des études économiques montrent que les exploitations africaines dont la surface est inférieure à 400 voire 600 m², conduisent à un prix de revient de la spiruline incompatible avec le marché international [290]. En effet, elles ne peuvent guère concurrencer ce marché international de plus en plus tendu, dont les exportations à très bas prix constituent une menace permanente pour les productions locales.

A noter que le niveau de rentabilité décrit ici pour l'Afrique existe probablement de la même façon dans les autres PVD.

Le système d'autofinancement comporte donc certains inconvénients en rapport avec ce qui vient d'être présenté. Le coût d'investissement sur le continent africain étant de l'ordre de 15 000 € les 100 m² (bâtiments compris), il apparaît difficile de prétendre à l'autosuffisance d'une exploitation si l'on ne dispose pas d'un minimum de 60 000 à 100 000 €. Cette somme n'étant pas à la portée de toutes les ONG, il est alors nécessaire de demander un financement extérieur à des bailleurs de fonds institutionnels. Une telle démarche est longue et exige une certaine expérience.

Par ailleurs, ces projets de moyenne envergure nécessitent une solide connaissance de la culture de spiruline et une certaine rigueur dans l'organisation et la gestion. Il est évident que l'échec d'un projet de grande taille a un impact considérablement plus large que celui d'une culture en petits bassins...

Néanmoins, si on s'est préparé dès le début à répondre aux problèmes financiers, les fermes de culture autofinancées semblent présenter de réels avantages :

- la production de plusieurs tonnes de spiruline par an permet de s'attaquer au problème de la malnutrition, à l'échelle nationale ;
- l'entreprise apporte une véritable richesse locale, en faisant travailler une équipe d'exploitation, des ateliers locaux pour la maintenance, des agents commerciaux, etc...

7.4 Quatrième difficulté majeure : le contexte économique mondial

Cette difficulté n'est pas spécifiquement liée à la spiruline mais le contexte économique mondial a un retentissement sur sa production locale. Si les projets spiruline ne prennent pas, c'est aussi parce qu'en produisant de la spiruline on ne génère pas d'argent ; on génère à manger pour des populations locales, ce qui ne présente aucun intérêt pour les institutions financières internationales assurant la tutelle des PVD.

En effet, il ne faut pas perdre de vue que la principale cause des difficultés des PVD à se sortir de la misère et de la famine est liée à la dette qu'ils ont contracté vis à vis des pays riches. Or, avec le recul, il semble que la politique menée par les institutions internationales financières et commerciales, a causé des dégâts qui ont encore aggravé la situation des pays pauvres. Le FMI (Fond Monétaire International), la Banque Mondiale et l'OMC (Organisation Mondiale du Commerce), chargées d'aider ces pays ont, semble-t-il, fait plus de mal que de bien depuis une trentaine d'années. Le FMI et la Banque Mondiale ont utilisé leurs statuts de créanciers privilégiés pour conditionner l'octroi de prêts aux PVD, avec en contrepartie une libéralisation de leur économie ; ces institutions ont favorisé l'ouverture des économies des pays endettés au marché mondial (multinationales occidentales) [291]. Mais, le modèle économique néolibéral a constitué un obstacle au développement des pays pauvres car il a généré des déficits de leur balance commerciale. Ces déficits ont ensuite été comblés par des emprunts extérieurs qui n'ont fait qu'augmenter l'endettement.

Rétrospectivement, il apparaît que cette politique a contribué à maintenir les pays pauvres dans le cercle vicieux de l'endettement et de la dépendance envers les pays riches.

Ainsi, les petits producteurs locaux des PVD doivent craindre à la fois les importateurs de spiruline à bas prix, et les investisseurs étrangers venant profiter de conditions climatiques favorables et d'une main d'œuvre bon marché. Si la production locale de spiruline revient plus cher que de l'importer des pays riches, les PVD qui souhaiteront s'en procurer continueront de s'endetter et leur économie locale en pâtira.

Par ailleurs, les règles imposées par les institutions financières ont malheureusement contribué au démantèlement des services publics, des services sociaux et de santé publique, des productions locales et des marchés intérieurs des PVD.

Des Plans d'Ajustement Structurels (PAS) ont été décidés par le FMI et la Banque Mondiale, de façon à ce que les pays lourdement endettés puissent équilibrer leur balance des paiements [292]. Mais, en réalité, ces pays ont dû brader leurs ressources nationales au profit des multinationales occidentales, et restructurer leur économie vers la production pour l'exportation, afin de se procurer des devises fortes pour payer leur dette.

Ces PAS défendent donc les intérêts des institutions financières et des multinationales appartenant aux pays riches ; ils sont synonymes de pauvreté et de dénuement pour les populations car ils sont pratiqués le plus souvent au détriment de leur survie. Le pire dans tout ça est que de nombreux dirigeants africains sont complices de cette situation, en déléguant leurs responsabilités politiques aux institutions financières internationales. Les grandes puissances sont effectivement parvenues à placer au pouvoir en Afrique des alliés sûrs et corrompus, de façon à pouvoir perpétuer ce système immoral [291].

En effet, suite aux PAS, l'essentiel de la politique économique des PVD est décidée à l'extérieur du pays concerné. La dette permet aux créanciers d'exercer des pressions très fortes sur les pays endettés ; les pays soumis à cette pression ont été progressivement contraints à abandonner toute souveraineté. Les gouvernements ne sont donc plus en mesure de mettre en place la politique pour laquelle ils ont été élus. Il s'agit en quelque sorte d'une nouvelle forme de colonisation.

N'est-il pas scandaleux de constater que de nombreux pays d'Afrique exportent des denrées alimentaires à des prix ridiculement bas vers l'Europe ou les Etats-Unis, alors que dans ces mêmes pays la moitié des enfants souffre de malnutrition ?

Il apparaît donc clairement qu'une autre solution doit être trouvée rapidement pour que ces pays arrivent à se relever. Les enfants et les populations à bas revenus sont finalement des victimes désignées puisqu'elles n'ont aucun poids politique pour se révolter contre l'écrasement manifesté par les pays riches.

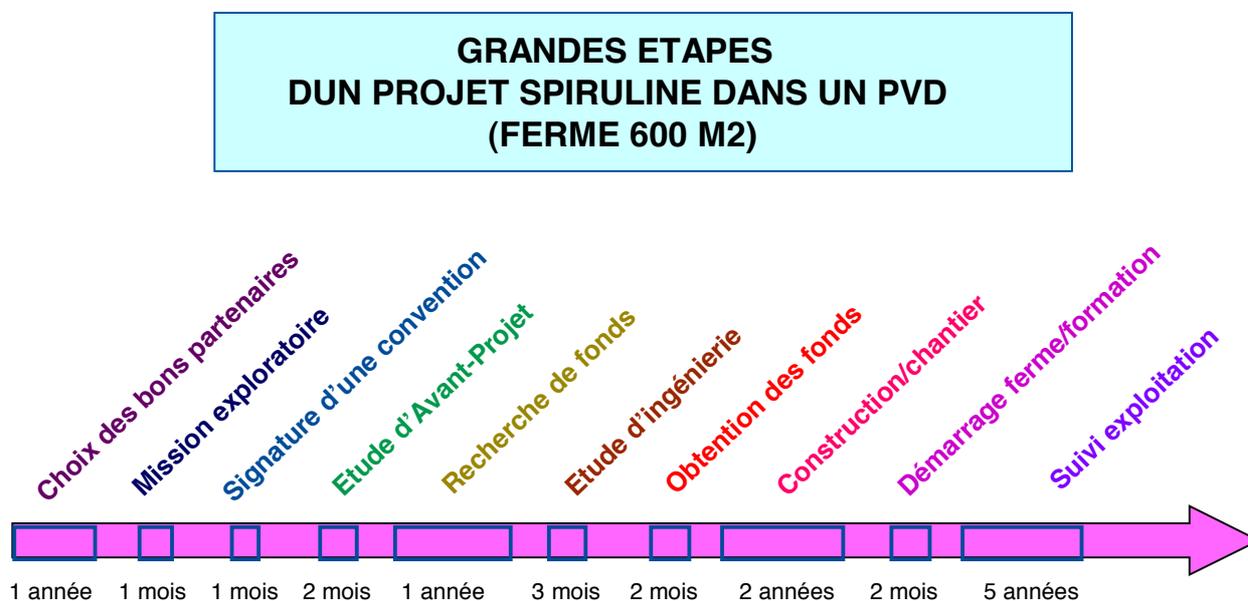
Les agences des Nations Unies (FAO, UNICEF, OMS), spécialisées dans le domaine de la lutte contre la faim et la malnutrition, bien que compétentes, sont trop timides vis à vis des règles économiques imposées par les institutions financières. Or, tant que les secteurs de la nutrition et de la santé seront soumis aux lois du marché, les populations les plus pauvres ne pourront jamais s'en sortir.

8. Conseils pour faciliter la réussite d'un projet d'exploitation de la spiruline sur du long terme

Un projet d'exploitation de spiruline en PVD se divise en plusieurs étapes successives et des conseils particuliers se rapportent à chacune d'elles. Le schéma représenté par la figure 79, indiquant toutes ces étapes dans le cadre d'une ferme de 600 m², est applicable quelle que soit la taille de l'exploitation [289].

Ces conseils sont le fruit de l'expérience et du vécu de membres de l'ONG TECHNAP (cf. 9.2), impliquée depuis une vingtaine d'années dans ce type de projets. Ils sont enseignés au Centre de Formation Professionnelle et de Promotion Agricoles de Hyères (CFPPA) [293].

D'après le schéma, on s'aperçoit qu'il faut compter entre 4 et 5 ans pour la préparation et la construction d'une ferme.



Sous la flèche représentant le temps qui passe, la durée moyenne de chaque étape est notée en petits caractères.

Figure 79 : Étapes d'un projet d'exploitation de spiruline [293]

8.1 Choix des partenaires

Avant de s'engager dans un tel projet, il convient de vérifier s'il existe une demande locale à la fois forte et bien identifiée. Pour cela, il suffit de se procurer de la spiruline et de vérifier son intérêt sur place. Si cet intérêt se confirme, il faut ensuite s'assurer qu'il n'existe pas déjà un site de production proche pouvant satisfaire aux besoins constatés.

Le choix du partenaire local est très important puisqu'il conditionne notamment la réussite et la pérennité du projet. Ce partenaire local doit :

- être demandeur du projet (besoins humanitaires réels)
- se situer dans un PVD politiquement stable et peu corrompu
- exister depuis longtemps
- avoir déjà à son actif des programmes de développement locaux réussis ;
- avoir parmi ses objectifs, la lutte contre la malnutrition
- disposer d'une ligne de téléphone, d'*Internet* ou d'un fax
- pouvoir nommer un chef de projet disponible.

Les principaux partenaires issus des pays riches sont : les ONG, les spécialistes de la spiruline, les bailleurs de fonds (banques, fondations, entreprises...), les fournisseurs de matériaux et équipements.

L'axe central du projet est l'alliance profonde entre l'**ONG** et le **partenaire local**. Ces deux partenaires doivent avoir des motivations claires et des objectifs humanitaires communs. Ils doivent se montrer totalement disponibles pour la cause commune et être à la fois compétents et complémentaires pour la mission qui leur revient.

8.2 Mission préparatoire

Avant le début du projet, cette mission consiste à faire se rencontrer les deux partenaires. C'est à ce moment qu'ils apprennent à se connaître et constatent des objectifs communs. Il doivent rédiger et signer une convention de projet.

Il est néanmoins fréquent de constater par la suite des problèmes et il est important que chaque partenaire suive la ligne de conduite qu'il a décrit dans la convention. Ces problèmes rencontrés sont :

- une absence de communication et d'écrits réguliers (en interne chez les deux partenaires et entre les partenaires) ;
- une volonté et/ou une compétence insuffisantes de la part d'un partenaire ;
- des objectifs cachés par l'un ou l'autre.

8.3 Rédaction et signature d'une convention de projet

Afin de limiter au maximum les problèmes décrits ci-dessus, cette convention doit préciser :

- le contexte du projet
- les principes communs des partenaires et les objectifs du projet
- les engagements de l'ONG et du partenaire local
- ses modalités d'application (gestion du projet, suivi et évaluation, gestion des fonds...);
- les responsabilités de chaque partenaire
- sa date de validité et sa durée
- la résolution des litiges.

8.4 Etude d'avant-projet

Elle doit être convaincante sur tous les plans : objectifs du projet, principes techniques et financement (budget d'investissement et budget d'exploitation). Bien entendu, elle doit être approuvée par les partenaires.

8.5 Recherche de fonds

Elle doit se faire impérativement après la signature de la convention et l'étude d'avant-projet. C'est une étape qui prend beaucoup de temps mais elle permet d'éclaircir les idées. La connaissance de la nécessité des deux types de budget est indispensable à ce stade.

8.6 Etude technique détaillée

Cette étape doit être traitée en parallèle ou après la demande de fonds. Elle prend aussi beaucoup de temps mais demeure indispensable. En effet, elle permet de définir en détail la construction et le fonctionnement de la ferme.

8.7 Construction

Elle doit être suivie au plus près sur le terrain, grâce à des missions successives. Cette étape passe par des Appels d'Offre ou parfois par des gré à gré. Elle devient officielle lorsque les procès verbaux de réception provisoire sont établis et prend fin au moment de la Transmission de Propriété.

8.8 Formation du personnel et démarrage de la culture

A ce stade du projet, il faut d'abord rédiger les procédures d'exploitation, puis recruter et sélectionner le personnel. Vient ensuite la formation de celui-ci. Il est essentiel de bien choisir le futur responsable d'une exploitation. Les qualités requises chez celui-ci sont les suivantes [290] :

- savoir lire, écrire et communiquer rationnellement ; au minimum il doit posséder le BEPC, la préférence voulant qu'il soit bachelier voire titulaire d'un diplôme Bac+2 ;
- savoir compter et pratiquer aisément le calcul mental et la règle de trois ;
- savoir observer et "ressentir" les plantes ;
- en cas d'exploitation importante, savoir commander et animer une équipe ;
- être totalement partie prenante de l'exploitation et de ses objectifs humanitaires.

Par ailleurs, le responsable d'exploitation ne doit pas être le responsable de l'organisation locale avec laquelle l'ONG a conclu un accord de partenariat. En effet, ce dernier, compte-tenu de son statut, est le plus souvent appelé à d'autres tâches.

Or, un responsable d'exploitation doit consacrer la majorité de son temps à la spiruline (voire la totalité pour les exploitations de plus de 3 personnes) : la rapidité d'évolution de la spiruline nécessite des soins quotidiens, ce qui n'autorise pas l'absentéisme.

En ce qui concerne la formation du personnel il existe actuellement trois ouvrages de référence dans le domaine de la culture des spirulines, destinés justement à aider les débutants : le "manuel de culture de spiruline artisanale" de J.P. Jourdan [29], "technique, pratique et promesses" de R. Fox [5], ainsi que celui de G. Planchon [294].

Depuis avril 2004, il est également possible, de venir se former au Centre de Formation Agricole de Hyères, lequel permet aux débutants de mieux connaître leurs futures tâches et d'éviter les principaux écueils [289] [290]. Dirigé par C. Villard, ce centre offre deux sortes de formations :

- des stages courts (5 jours), réservés plutôt aux responsables ou chefs de projet d'ONG. Un de ces stages est spécifiquement consacré à "l'organisation de projets spiruline en PVD".
- des stages longs (cycle de 400 heures comprenant 3 mois à Hyères suivis d'1 mois dans une ferme en PVD). Ils sont plutôt réservés aux futurs chefs de projet ou responsables d'exploitation des fermes de production.

A noter que pour la formation de l'exploitant, les ouvrages précédemment cités ne sont pas exploitables en l'état, car souvent trop riches. Il est préférable de rédiger un « mode d'emploi de la ferme » adapté aux conditions particulières du site.

En ce qui concerne plus particulièrement la formation "gestion du personnel" de l'exploitant responsable, voici quelques conseils issus de l'expérience de producteurs de spiruline au Burkina Faso [293] :

- Etablir un organigramme de l'exploitation, un règlement intérieur et préciser par écrit les tâches de chacun. A titre d'exemple, le schéma de la figure 80 représente l'organigramme de la ferme Koudougou (Burkina Faso) ;

- Concentrer la responsabilité de l'exploitation, tant technique que financière, sur une seule et même personne ;
- Etablir dès que possible une comptabilité de la ferme. Quelle que soit la solution de financement de l'exploitation, la connaissance des coûts d'exploitation est nécessaire. Il est indispensable de s'opposer à la tendance naturelle dans les PVD visant à travailler au jour le jour et commençant à chercher de nouvelles recettes lorsque les caisses sont vides.

Bien que banales, de telles vérités ne sont pas forcément claires dans tous les esprits, tant au niveau du partenaire local que de l'ONG. En principe, aucun projet ne devrait voir le jour sans l'établissement d'un compte d'exploitation mensuel prévisionnel, préparé en parallèle avec le budget d'investissement [293] ;

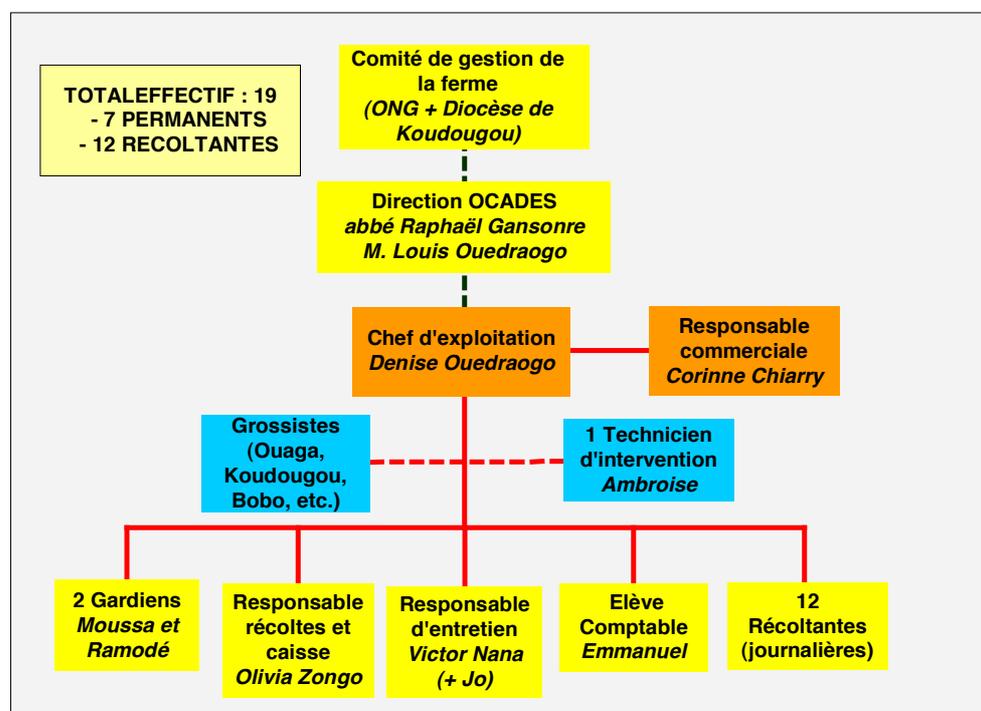


Figure 80 : Organigramme des ressources humaines pour la ferme de Koudougou, établi en mars 2006. © TECHNAP 2006

- Savoir impliquer le personnel dans le fonctionnement de la ferme. Le salaire peut apparaître comme un dû, quel que soit le travail effectué, à l'image du fonctionnariat, très prisé en Afrique. Or, il est essentiel que chaque employé comprenne que la ferme fonctionne uniquement grâce à la volonté et au labeur de chacun : le salaire perçu doit refléter très exactement les résultats de la production. Des primes à la productivité sont parfois utilisées car elles constituent un excellent moyen de prise de conscience et de motivation.

Le responsable de l'exploitation doit néanmoins veiller à ce que l'équipe travaille dans un bon état d'esprit, avec une communication professionnelle permanente au sein de celle-ci. Quelles que soient les difficultés d'implantation de l'esprit d'entreprise, le fait de travailler chaque jour pour une cause humanitaire devrait constituer un moteur essentiel de réussite et de progrès rapide au sein d'une équipe.

Une fois que le responsable de l'exploitation s'est procuré la souche de spiruline à ensemer, le démarrage de la culture peut avoir lieu. Elle débute dans des bassines avant d'être transférée dans le ou les bassins construits.

8.9 Suivi de l'exploitation, circuits humanitaires et commerciaux

Ce suivi de l'exploitation consiste à :

- améliorer les procédures d'exploitation afin de diminuer le prix de revient ;
- surveiller la comptabilité
- diagnostiquer les difficultés rencontrées lors de la culture et apprendre progressivement à y faire face sans aide extérieure.

Concernant la **part de la production destinée à la distribution humanitaire**, le suivi consiste à :

- choisir des circuits fiables pour cette distribution
- calculer le pourcentage de la production qui peut être distribuée socialement
- définir son prix
- constater l'efficacité sur les sujets malnutris.

Le but de ce type d'exploitation étant au final de pouvoir distribuer de la spiruline à moindre coût pour la population locale dans le besoin, le responsable de la ferme doit chercher des solutions pour augmenter cette part de la production. En réalité, si on reprend la formule décrite précédemment, les degrés de liberté dont il dispose sont assez limités :

- le prix de vente commercial ne peut augmenter au-delà d'un certain seuil. En effet, il doit tenir compte de la concurrence nationale et internationale qui, si elles n'existent pas au démarrage du projet, seront vite présentes dès lors que la spiruline aura du succès localement ;
- la marge d'exploitation ne peut pas trop se réduire car le risque est de mettre en danger la santé financière de la ferme ;
- le prix de la part humanitaire dépend du pouvoir d'achat des plus démunis, lequel est nul dans certains cas ; il n'est donc pas question de l'augmenter.

Reste alors la possibilité d'action sur le prix de revient [290].

La diminution de ce prix de revient passe bien sûr par la rationalisation de l'exploitation, en améliorant notamment les techniques de récolte et d'ensachage, en trouvant des intrants moins chers, et en diminuant la consommation énergétique (eau, électricité, gaz).

Cependant, le moyen de loin le plus efficace consiste à augmenter la surface de l'exploitation, afin de bénéficier de l'effet d'échelle. Cela permet en effet de :

- diminuer la part relative du personnel non productif (charges fixes)
- améliorer la productivité des récoltants grâce à des ateliers centralisés et l'utilisation de pompes de récolte ;
- diminuer les coûts spécifiques d'entretien (séchoirs et bassins plus grands, matériel labo, informatique, frais de téléphone)
- diminuer le coût des intrants (achats en gros)
- diminuer le coût relatif de l'ensachage (commandes en gros) et de la publicité
- limiter les coûts énergétiques (eau : utilisation de forage — électricité : système solaire raccordé au réseau).

En ce qui concerne la **part de production destinée à la vente commerciale**, les modalités sont :

- fixer le prix de vente
- choisir un représentant commercial et définir précisément son rôle
- débiter la promotion pour faire connaître la spiruline et ses bienfaits, à une large population ;
- définir des lieux de vente stratégiques
- choisir un conditionnement adapté à une conservation optimale, tout en gardant à l'esprit les soucis d'économie.

9 Principales associations intégrant dans leurs projets la culture de spiruline dans les PVD

9.1 Antenna Technologies

Antenna Technologies France (ATF, enregistrée au Journal Officiel le 15/10/2002) est l'émanation d'une association d'origine suisse, Antenna Technologies Genève, créée en 1990, à but non lucratif et reconnue d'utilité publique. Au terme de 10 années de recherches dont 5 ans de développement de sites pilotes en Inde et en Afrique, l'association suisse a développé un programme de technologies appropriées pour la culture de spiruline à l'échelle locale dans les pays défavorisés. ATF est une association "loi 1901" engagée dans la lutte contre la malnutrition, plus spécialement auprès des enfants de 0 à 5 ans [295]. Elle a également choisi la spiruline comme complément alimentaire privilégié pour mener ce combat. Elle se compose d'une trentaine de scientifiques de haut niveau et pluridisciplinaires, chargés d'effectuer les recherches et développements. Ces scientifiques ont notamment déjà validé, par une démarche scientifique, les propriétés nutritionnelles de la spiruline.

Ils ont également mis au point des systèmes de production en bassins, spécialement étudiés pour les pays à climat tropical [296].

Ses actions sont les suivantes [297] :

- mettre en place des sites de production de spiruline autonomes dans des pays où la malnutrition constitue un problème important ;
- fournir les souches de spiruline, ainsi que les méthodes de culture ;
- intervenir dans le repérage des sites, la supervision de la construction des bassins de culture ;
- assurer la formation sur place et, par la suite, une assistance régulière et la mise en place d'un équilibre financier pérenne, de façon à assurer la production dans la durée.

V. Guigon est le directeur technique restant sur le terrain ; c'est lui qui se charge de l'évaluation des sites, de la formation des équipes et du contrôle des projets sur le terrain. Il s'occupe aussi de la prospection et de la liaison avec d'autres ONG.

Antenna s'efforce de rester une structure souple pour assurer une utilisation optimale des fonds sur les projets (formation et fonctionnement). Elle coopère avec d'autres associations pour éviter les doublons et assurer une diffusion rapide de la spiruline.

Tous les membres de l'association en France sont des bénévoles: ils assurent la recherche, la mise en oeuvre, le financement et le support logistique des projets [298].

Les principaux sites où la spiruline est exploitée grâce à Antenna sont : Madurai (Inde du sud), Dakar (Sénégal), Bangui (République Centre Afrique), Tuléar (Madagascar), Loumbila (Burkina Faso, Safo (Mali) et Balejera (Niger).

Avec 500 m² de nouveaux bassins mis en production en 2006, Antenna Technologies a permis la production d'environ 1,5 tonne de spiruline, ce qui représente des traitements pour 15 000 enfants pendant 6 semaines [297].

9.2 TECHNAP

TECHNAP est une association “loi 1901” créée en 1985, qui milite pour la mise en œuvre de technologies appropriées en faveur des pays en voie de développement. C’est en fait un collectif rassemblant des ONG ayant les mêmes motivations et méthodes dans le domaine de la lutte contre la malnutrition. Leur *credo* est le suivant : l’amélioration de la santé par le biais de l’acquisition d’un meilleur statut nutritionnel est à la base de toute politique de croissance.

L’association ACMA de R. Fox faisant partie des ONG représentées par TECHNAP, cette dernière a bénéficié de l’expérience de l’algologue en matière de spiruline. C’est donc naturellement qu’elle a choisi de promouvoir la culture et la diffusion d’*Arthrospira platensis* pour lutter contre la malnutrition.

TECHNAP comprend une trentaine de membres, tous bénévoles, ingénieurs ou techniciens pour la plupart. Les associations qui la composent sont notamment représentées par Targuinca, le GERES (Groupe Energies Renouvelables, Environnement et Solidarités), le CEPAZE (Centre d’Echanges et Promotion des Artisans en Zones à Equiper) ou CODEGAZ (association humanitaire du personnel de Gaz de France) [299].

TECHNAP recherche constamment des solutions nouvelles aussi bien pour la construction des fermes de production, leur exploitation et la distribution, que pour les aspects plus théoriques concernant la spiruline elle-même. Son objectif est de progresser au niveau de chaque étape des projets d’exploitation des fermes de spiruline : construction des bassins et de leurs équipements, méthodes de culture et de récolte, méthodes de séchage, méthodes de conditionnement...

Les réalisations lancées ou menées par TECHNAP sont essentiellement situées au Bénin et au Burkina Faso.

9.3 CODEGAZ

Il s’agit d’une association “loi 1901” reconnue d’intérêt général et partenaire de Gaz de France. Fondée en 1989, son siège social est basé à Paris et son président actuel est François Guilleminot.

Elle regroupe des salariés et des retraités bénévoles de Gaz de France et contribue à des actions de développement intégré [300].

Son but est d’apporter une aide humanitaire aux PVD et aux populations du quart-monde. Cette aide a pour vocation le développement durable des populations les plus défavorisées. Elle s’accompagne généralement d’un transfert de savoir-faire et de la création d’emplois. Le souhait des membres n’est pas d’imposer un schéma de développement aux populations concernées, mais de mettre à leur disposition les moyens et les compétences des équipes, afin d’aider à la réalisation des projets locaux.

CODEGAZ coopère avec d’autres associations ou organisations impliquées dans le quart-monde et les PVD, pour satisfaire des besoins locaux exprimés et vérifiés, « selon des critères humanitaires partagés ».

A l’heure actuelle, 22 projets ou actions de solidarité sont mis en œuvre dans divers pays en voie de développement.

Ses actions concernent plusieurs domaines [301] : la nutrition, le parrainage d'enfants, l'eau, l'enseignement/formation, la santé, l'énergie et le développement durable. En matière de nutrition, l'association s'est spécialisée dans la culture de spiruline.

Les réalisations de CODEGAZ en 2006 en matière de spiruline font suite à quatre expériences réussies de mise en place de la culture de spiruline au Bénin, au Burkina Faso, à Madagascar et au Togo.

Au vu des résultats obtenus dans l'ensemble des pays bénéficiant d'une production de spiruline, CODEGAZ est convaincue de l'efficacité de cette cyanobactérie pour réduire les conséquences de la malnutrition dans les PVD.

Une fois la viabilité d'un projet et la conformité du partenaire examinées, CODEGAZ établit une convention de partenariat avec les représentants locaux de la population. Cette convention a une valeur contractuelle et sert de référence au suivi ainsi qu'aux contrôles effectués au fur et à mesure de l'avancement du projet. Les membres de CODEGAZ s'attachent à partager leur savoir-faire entre les différents projets conduits par diverses équipes.

Les principales ressources de CODEGAZ sont constituées par : les cotisations des adhérents, les dons de particuliers ou d'entreprises, les subventions ou contributions de partenaires (Fondation d'Entreprise Gaz de France, Unités de Gaz de France, organismes de santé, autres ONG...), les subventions allouées par les organismes institutionnels (Communauté Européenne, Ministère des Affaires Etrangères, Collectivités territoriales ...) [302].

Les projets déjà réalisés grâce à cette association concernent les pays suivants :

- le Bénin (1993-1995 et 2000) ;
- le Togo (1997) ;
- le Burkina Faso (1999-2002) ;
- le Gabon (2003) ;
- Madagascar (2003-2005) ;
- le Niger, le Sénégal et le Mali (2005-2007).

Les membres de l'association estiment avoir sauvé 1 000 enfants par jour depuis leur contribution à la lutte contre la malnutrition grâce à la spiruline, jusqu'en 2005. A partir de 2007, leur objectif est d'en supplémenter 15 000 par jour.

9.4 Targuinca

L'association Terre-Monde Targuinca est une ONG française basée en Haute-Normandie (Houlbec-Cocherel, Eure), créée en 1990. Il s'agit d'une association de solidarité internationale reconnue d'intérêt général par l'Etat français ; elle a pour objet d'apporter aide et soutien aux populations sud-sahariennes victimes d'isolement et de misère [303].

Cette association a effectué de nombreuses missions conduites par des bénévoles pour acheminer des aides d'urgence au Pérou, en Algérie, en Ukraine et en Roumanie : médicaments essentiels et matériel de chirurgie, cabinets dentaires, couveuses, vêtements, matériel scolaire, pièces de rechange pour pompes hydrauliques et compléments alimentaires [304].

En 1993, Targuinca a fusionné avec ACMA ; depuis, elle a orienté l'essentiel de ses actions dans la lutte contre la malnutrition. En 1995, elle a pris définitivement la succession d'ACMA, laquelle n'existe plus depuis cette date.

Depuis 2001, Targuinca intervient principalement auprès des populations nomades du Niger et, tout en continuant à apporter des aides d'urgence, s'attache de plus en plus à appuyer des projets de développement durable.

Entre 2001 et 2002, des bassins de spiruline ont été implantés et l'association a participé au suivi médical des enfants admis au Centre Pédiatrique de Niamey [305].

Ses actions sont [304] :

- la promotion et le développement de la spiruline comme solution au problème de la faim dans le monde ;
- la formation de personnel à la culture de la spiruline ;
- l'implantation de fermes de spiruline dans une dynamique communautaire, avec l'objectif d'assurer l'autosuffisance alimentaire des populations villageoises.

Les moyens utilisés sont [305] :

- la distribution de spiruline dans les établissements de santé (hôpitaux, dispensaires de brousse, associations familiales) ;
- l'adaptation des cultures aux ressources naturelles locales et leur intégration aux actions de développement du pays ;
- l'étude des propriétés nutritionnelles et thérapeutiques de la spiruline sur des pathologies ciblées ;
- un travail en partenariat étroit avec les populations et les ONG locales.

Les projets et réalisations de l'association sont avant tout motivés par des liens d'amitié sincère, de confiance et de respect, tissés avec les partenaires nigériens : ADDS (Alliance pour le Développement Durable et la Solidarité), Andital (association pour le développement du pastoralisme), populations de Gougaram et de Tchinn Telloust, écoles d'Awidarere et d'Eneker, service de pédiatrie de l'Hôpital de Niamey, etc.

Tous les membres de Targuinca agissent en tant que bénévoles.

Ceux-ci paraissent être avant tout attentifs aux besoins et aux demandes réelles des populations car ils s'arrangent toujours pour que ce soit des partenaires locaux qui soient porteurs des projets. Cela permet effectivement de les impliquer activement dans la réalisation de ces projets.

L'association s'autofinance partiellement grâce aux cotisations, appels aux dons et manifestations. Pour financer les projets importants, elle demande des subventions à des bailleurs de fonds. La totalité des fonds collectés est ensuite directement reversée aux populations nécessiteuses, dans le cadre des projets soutenus [305].

9.5 CREDESA

Le Centre Régional pour le Développement et la Santé mène depuis 1983, des activités visant la promotion des soins de santé primaires au Bénin. C'est un organisme sous tutelle des Ministères de l'Éducation et de la Santé. Une de ses activités principales concerne l'éducation nutritionnelle de la population [306].

Cet organisme regroupe notamment des médecins, nutritionnistes, assistantes sociales, sages-femmes.

Ces spécialistes sont chargés de montrer aux mères de famille comment optimiser les ressources naturelles du pays (légumes, fruits, poissons) pour mieux nourrir leurs enfants, en équilibrant leurs repas.

Lorsqu'il a eu connaissance de la spiruline, le CREDESA a tout de suite vu le parti que l'on pouvait tirer de sa disponibilité locale.

Comme l'éducation nutritionnelle des mamans ne pouvait régler tous les problèmes, il fallait autre chose. Or, aux yeux des membres de cet organisme, la spiruline permet d'apporter sous une forme concentrée, un contenu étonnant en protéines, vitamines et autres micro-nutriments de grande valeur.

La spiruline a finalement offert un levier incomparable pour accompagner la politique d'éducation nutritionnelle du CREDESA. Des diètes sans valeur sont dès lors enrichies avec un peu de spiruline ; en ce qui concerne les enfants gravement dénutris, cette dernière constitue une alternative aux traitements lourds en hôpital.

A noter que lorsqu'il a pris conscience de l'atout que pouvait représenter la spiruline pour accroître l'impact de sa politique santé dans la population, le CREDESA a signé un partenariat avec TECHNAP et le GERES (expert en séchage des denrées alimentaires), pour monter un projet de production de spiruline à Pahou. C'est majoritairement grâce aux subventions de l'Union Européenne et du Ministère Français des Affaires Etrangères, que ce projet a pu démarrer en 1998 [306].

9.6 OCADES

L'OCADES est l'Organisation Catholique pour le Développement et la Solidarité. Il s'agit d'une organisation apolitique à but non lucratif implantée au Burkina Faso. Elle a été créée en 1973, lors de la Conférence Épiscopale du Burkina mais n'a été officiellement reconnue par l'Etat Burkinabé qu'en mai 1998 [307].

Ses services concernent le financement d'activités hydrauliques rurales et de projets ayant rapport avec la sécurité alimentaire. L'organisation s'est notamment impliquée dans le financement de la construction de plusieurs fermes d'exploitation de spiruline au Burkina.

9.7 ALCMK

C'est l'Association de Lutte Contre la Malnutrition au Kanem (Tchad). L'actuel président se nomme Malloum Abakar Kaya. Un des objectifs de cette association est de sensibiliser la population du Tchad à l'utilisation de la spiruline comme aliment de lutte contre la malnutrition et d'améliorer les techniques de transformation du Dihé [308].

Les buts de l'association sont :

- améliorer les conditions socio-économiques des femmes ;
- aider les femmes productrices de Dihé à se prendre en charge en leur offrant un emploi ;
- développer la commercialisation d'un produit de qualité.

Les objectifs de l'apprentissage sont :

- connaître les techniques de récolte, filtrage, pressage, séchage et conservation du Dihé ;
- respecter les mesures élémentaires d'hygiène ;
- mettre en valeur un produit de qualité à travers des activités génératrices de revenus ;
- informer et sensibiliser la communauté sur les propriétés nutritionnelles de la spiruline.

Pour mener à bien son projet, l'association s'appuie sur des spécialistes aptes à la formation et à la sensibilisation des populations. Elle bénéficie de l'intervention de partenaires extérieurs pour la partie technique et les matériaux.

Cette association souhaiterait au minimum former 120 femmes, sensibiliser 1 000 personnes sur les propriétés nutritionnelles du Dihé et créer 3 unités de transformation de la spiruline.

10. Exemples de productions locales de spiruline

10.1 En Afrique

10.1.1 BURKINA FASO

Le Burkina Faso (figure 81) est le premier pays au monde à avoir reconnu la valeur de la spiruline et à en avoir inscrit la production dans ses priorités.

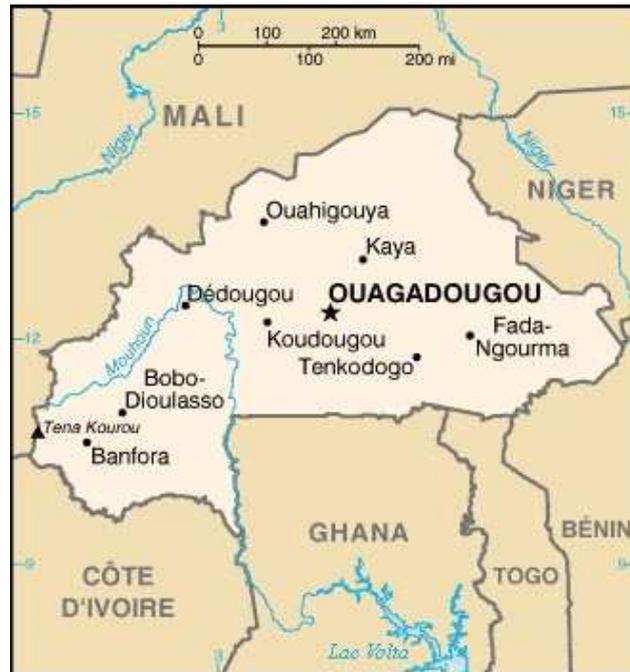


Figure 81 : Carte du Burkina Faso. © ATF

▪ Koudougou

Historiquement c'est dans cette ville située à 100 km à l'Ouest de Ouagadougou (capitale du pays) que la production de la spiruline a commencé en 1999, sous la direction de l'OCADES Koudougou et de l'ONG française CODEGAZ [309][310].

Les trois principaux objectifs de la ferme du Petit Séminaire (figure 82) étaient alors de :

- fournir les centres de récupération nutritionnelle du diocèse (CREN) et les centres de santé Burkinabé de façon à lutter contre la malnutrition. Cette partie, initialement vendue à perte, est aujourd'hui encore subventionnée par la partie commercialisée ;
- commercialiser le reste de la production (80 %), de façon à équilibrer les coûts de production et proposer à la population locale une spiruline bon marché ;
- lutter contre le chômage de la ville de Koudougou, grâce à la création d'emplois au niveau de la ferme.

Aujourd'hui sa production moyenne est de 170 kg/mois.

La ferme est gérée comme une entreprise moderne et satisfait à l'autofinancement de sa production. Elle doit aussi rassembler les fonds nécessaires pour son développement. Elle n'en reste pas moins une entreprise à vocation humanitaire dans le sens où l'objectif reste une minimisation des prix de vente de la spiruline pour le grand public et la distribution à perte pour les plus démunis. La production de la ferme a été agréée par le ministère de la santé en 2005 après vérification de la qualité de la spiruline [310].



Figure 82 : Ferme du Petit Séminaire à Koudougou. © ATF

▪ **Nayalgue**

La grande demande du marché (les carences alimentaires sont particulièrement caractérisées au Burkina Faso) et le succès de la spiruline cultivée à Koudougou ont été à la base d'un nouveau projet du Diocèse de Koudougou.

Nayalgue se situe à 7 km de Koudougou.

Depuis 2001, CODEGAZ par l'intermédiaire de Pierre Ancel, imagine un projet de grande envergure qui offrirait des tonnages de spiruline plus importants, à la mesure des besoins du pays et des pays limitrophes. L'effet de taille, en permettant une diminution des coûts de revient, pourrait permettre une augmentation significative de la part humanitaire. C'est donc un projet de ferme de 3 600 m² de bassins qui a été étudié puis décidé. Il est le résultat d'un partenariat entre le Gouvernement Burkinabé (maître d'ouvrage), l'OCADES (maître d'œuvre) et TECHNAP [310].

TECHNAP apporte à l'OCADES son expertise en matière d'ingénierie, de contrôle de gestion, d'achat et d'approvisionnement de matériel depuis la France, de sélection et formation du personnel, de promotion et de distribution de la spiruline. Cette association est également présente auprès du Ministère de la Santé, pour l'aspect "recherche médicale".

La recherche des financements nécessaires a été entreprise et le Gouvernement Burkinabé, conscient de ses responsabilités en matière de politique de la santé du pays, a décidé non seulement de financer la totalité des investissements mais aussi de subventionner des recherches médicales sur l'efficacité de la spiruline (préciser son rôle dans la lutte contre la malnutrition et mieux connaître son rôle dans le traitement des personnes affectées par le VIH) [310].

A noter que c'est la première fois en Afrique, et sans doute au monde, qu'un gouvernement apporte un tel soutien officiel et finance complètement la construction d'une ferme de production de spiruline.

Les travaux ont débuté en janvier 2005. Une fois terminés, la surface totale de culture devrait se composer de 18 bassins de 200 m² chacun + 2 bassins d'ensemencement de 50 m² chacun + 9 bassins de vidange de 50 m² chacun. La ferme est actuellement en exploitation et il est possible de la visiter.

A terme, les objectifs de la ferme sont de produire 8 tonnes par an (soit 600 kg par mois) de spiruline. Compte tenu de cette capacité de production, il est prévu que la ferme puisse fournir de la spiruline à trois groupes cibles :

- groupe 1 : les enfants de moins de cinq ans souffrant de malnutrition grave et pris en charge dans les CREN (16 600 enfants dénutris traités/an : 25 % de la production) ;
- groupe 2 : les personnes vivants avec le VIH (2 000 malades traitées par an : 20 % de la production) ;
- groupe 3 : au sein de la population générale, toute personne soucieuse d'améliorer son état de santé (44 000 personnes par an : 55 % de la production) : il est en effet prévu que cette part de production soit revendue en Afrique de l'Ouest et en Europe, de sorte à assurer l'équilibre financier de la ferme.

Cette ferme, tout en restant artisanale dans ses techniques de production, sera une véritable entreprise à vocation humanitaire lorsqu'elle aura atteint ces objectifs. Elle devrait alors employer 40 personnes.

▪ **Loumbila** (15 km au Nord de Ouagadougou)

Avec le soutien d'ANTENNA Technologies Genève, l'association des Travailleuses Missionnaires, laquelle recueille des enfants laissés à l'abandon, a entrepris en l'an 2000 la culture de spiruline sur le site de l'orphelinat.. La production permet de fournir un complément alimentaire de façon à améliorer la nourriture de ces enfants.

Au départ, 4 bassins de 10 m² (en briques de pierre taillée + bâche plastique avec protection par des serres) ont été construits. Ces cultures ont ensuite été complétées par d'autres bassins.

Actuellement, 330 m² sont exploités, avec une productivité moyenne de 6g/j/m² (soit une production mensuelle de 50 kg). Cette surface permet le traitement de 6 600 enfants [309].

La production est destinée pour une part à l'orphelinat de Loumbila, et pour l'autre partie, à la commercialisation.

L'équipe sur place prévoit une extension jusqu'à 690 m² de surface totale de bassins, ce qui permettrait de traiter 7 200 enfants supplémentaires. A la fin de l'année 2007, le financement n'avait pas encore été trouvé.

- **Bobo Dioulasso** (2^{ème} ville du Burkina)

L'Ordre de Malte, présent au Burkina Faso, soutient financièrement une structure locale d'aide aux plus démunis (dispensaires-trottoirs) dans cette ville. ANTENNA apporte son soutien pour que cette structure puisse fournir de la spiruline aux populations dont elle s'occupe. Deux bassins de 10 m² ont donc été construits [309].

Actuellement, la production tourne mais la productivité pourrait encore être améliorée ; chaque jour, environ 20 doses journalières sont fournies à des enfants de 1 à 5 ans.

- **Ouahigouya** (4^{ème} ville du Burkina)

ANTENNA, par l'intermédiaire de deux citoyens suisses installés dans la ville (André et Chantal BUHLER), a projeté la construction de 400 m² de bassins qui pourront produire 800 kg de spiruline.

En 2005, la ferme fonctionnait avec 125 m² de bassins et une productivité de 3g/jour/m² ; celle-ci devait être améliorée en 2006 pour atteindre 5g /jour/m² [309].

- **Nanorro** (75 km au Nord de Koudougou)

Jacqueline et Roger Cousin, promoteurs du projet, ont confié à l'OCADES (opérateur de la ferme de Koudougou) la gestion financière de leur projet et, à ANTENNA Technologies, le suivi technique et opérationnel.

A coté des deux petits bassins « historiques », deux bassins de 60 m² chacun ont récemment étéensemencés. Deux autres bassins de 60 m² sont déjà construits et devraient être mis en service ultérieurement [309].

- **Sapouy** (province du Ziro, 100 km au sud de Ouagadougou)

Deux bassins de 10 m² chacun produisent en moyenne 120 g de spiruline par jour [309].

- **Sabou** (sur l'axe Ouaga - Bobo à 85 km de Ouagadougou)

Six bassins de 20 m² doivent être exploités dans un avenir proche ; il est prévu que la spiruline produite soit distribuée aux CREN et aux personnes nécessiteuses [309].

10.1.2 BENIN

Il existe actuellement deux sites de production : historiquement le premier est celui de Davougon, l'autre est installé à Pahou (figure 83).



Figure 83 : Carte du Bénin. © Antenna Technologies France

▪ Davougon

TECHNAP a fait ses premières armes au Bénin, en 1993-1994, dans ce village. A cet endroit se trouve le Centre de Santé St Camille qui abrite un dispensaire, un centre anti-lèpre et une unité de formation de jeunes filles. Ce centre a été fondé par des frères Camilliens.

A la suite de contacts entre Etienne Boileau, membre de TECHNAP, et le Père Bernard Moéglé du centre St Camille, les frères Camilliens ont décidé de favoriser un premier essai de production de spiruline : un bassin expérimental en bois-plastique de 4 m² a donc été réalisé en 1993.

A ce bassin pilote, se sont progressivement ajoutés d'autres bassins en béton, l'ensemble atteignant actuellement 33 m² [310].

La productivité est de 5 g de spiruline/jour. La biomasse essorée n'est pas séchée : elle est distribuée, dès sa récolte, tous les jours, en dilution avec de l'eau sucrée, aux malades hospitalisés du Centre St Camille. Elle n'est pas uniquement fournie à des enfants malnutris, mais aussi à des tuberculeux et des personnes contaminées par le VIH ; la spiruline leur fait le plus grand bien en augmentant leur résistance aux nombreuses maladies opportunistes qui les guettent.

▪ Pahou

Désirant doter le Bénin d'une ferme de spiruline un tant soit peu significative vis-à-vis des problèmes de malnutrition du pays, TECHNAP (Étienne Boileau, Claude Darcas) a abordé en 1995 le CREDESA (Yvette Pagnon).

L'unité de production de spiruline a démarré son activité en 1998. A partir de cette date et jusqu'en 2001, 8 bassins de 30 à 40 m² chacun (total 260 m²) ont pu être mis en place sur un terrain appartenant au CREDESA (figure 84) [310].

Un laboratoire, un magasin et deux séchoirs ont ensuite été ajoutés. Le responsable de la ferme, Roger Adoukpe, ingénieur agronome était à cette époque secondé par une personne chargée des ventes, une équipe de 2 ouvriers et 5 femmes récoltantes.

Fin 2002, une première extension de la ferme a pu se faire, grâce à des crédits japonais. Les travaux ont permis de donner de l'air au site (accroissement de la surface du terrain d'environ 1 000 m²), et de mettre en place des nouveaux bassins portant ainsi la surface exploitée à 500 m². Cependant, il faudrait une surface de 1 000 m² pour que la ferme de Pahou puisse mieux répondre à la demande et produire à un meilleur coût de revient. Dans ce cas, les ventes de spiruline au secteur humanitaire pourraient être augmentées.



Figure 84 : Parpaings de béton revêtus de bâches en plastique, sur le site de la ferme de Pahou. © spirulinefrancefree.fr

10.1.3 NIGER



les points en vert foncé
représentent les
programmes réalisés ;

les points en vert clair
représentent les projets.

Figure 85 : Carte du Niger. © Antenna Technologies France

- **Boubon** (coopérative Banituri à 24 km au Nord-Ouest de Niamey)

Cette coopérative, basée à Niamey, a comme objectif principal l'amélioration de la santé de la population nigérienne, en produisant et en mettant à disposition des produits phytothérapeutiques à bas prix.

Avec le soutien d'ANTENNA Technologies, un projet d'exploitation de spiruline est en cours. A terme, 400 m² de surface de culture devraient permettre le traitement de 8 000 enfants.

Actuellement, la productivité est de 2,2 kg par mois ; elle doit être améliorée [311].

- **Balleyera** (100 km au Nord de Niamey)

Un partenariat entre la coopérative agro-pastorale de Tabarnassa, CODEGAZ et ANTENNA Technologies France a permis la construction de 200 m² de surface de bassins.

Le but est d'étendre cette surface à 400 m², ce qui permettrait de soigner 8 000 enfants. Depuis son lancement en mars 2006, la ferme fonctionne très bien et a une productivité de 6,7g/m²/jour [311].

- **Dogondoutchi** (300 km à l'Est de Niamey)

En partenariat avec TARBIYYA TATALI, une association de développement local à la fois dynamique, compétente et motivée, un projet d'exploitation de spiruline a débuté au début de l'année 2007.

Grâce au financement de la première phase de travaux, par l'association Talents et Partage (Société Générale), la construction de bassins d'une surface totale de 50 m² a démarré au premier semestre. Cette phase pilote doit se poursuivre par une extension de 200 m² d'ici la fin de l'année et de 200 m² supplémentaires courant 2008 [311].

Le futur chef d'exploitation était en cours de formation au début de l'année 2007. La souche de spiruline, fournie par ANTENNA, a dû arriver sur place dans le courant du mois de juin et la production a dû commencer fin juillet.

Depuis avril 2007, en attendant la production locale, de la spiruline en provenance d'un autre site de production nigérien a été distribuée dans Dogondoutchi pour permettre aux populations de faire connaissance avec ce produit.

▪ **Bermo**

Ce projet a été mis en place au dispensaire de la mission catholique Notre-Dame des Apôtres, dirigée par Sœur Odile Lesenne, grâce à un financement de l'association Tibériade. Les premiers bassins en béton offraient une surface de 2 x 15 m². La spiruline y est exclusivement nourrie grâce à des produits disponibles localement [311].

Avant l'installation d'une centrale solaire au dispensaire, l'agitation s'effectuait manuellement. Cette centrale photovoltaïque a été installée en novembre 2001, par des étudiants en BTS d'un lycée technique d'Angers.

La production de spiruline est utilisée dans sa totalité par le dispensaire.

▪ **Agharous** (80 km au Nord-Ouest d'Agadez)

Depuis février 2000, un programme de sensibilisation aux qualités nutritionnelles et thérapeutiques de la spiruline a été mis en place au Niger : l'association Targuinca a fourni des stocks de spiruline et organisé leur distribution dans les hôpitaux de Niamey et d'Agadez, ainsi que dans des dispensaires de brousse (au Nord du pays).

Durant cette période, Targuinca a été orientée vers le village d'Agharous pour implanter les premiers bassins. Le projet a été réalisé en partenariat avec l'ADDS (Association pour le développement durable et la solidarité). Son fondateur, Issouf Maha, dirige le Centre d'Agro-écologie et de développement intégré d'Agharous, centre de formation et de recherche sur les techniques agricoles adaptés à l'environnement oasien.

En mars-avril 2002, deux bassins de 13 m² (banco et bâches plastiques) ont été installés dans ce Centre.

La souche *Paracas*ensemencée a été donnée par J.P. Jourdan.

L'agitation est manuelle et la spiruline est séchée car la consommation de spiruline fraîche pose problème en zone nomade.

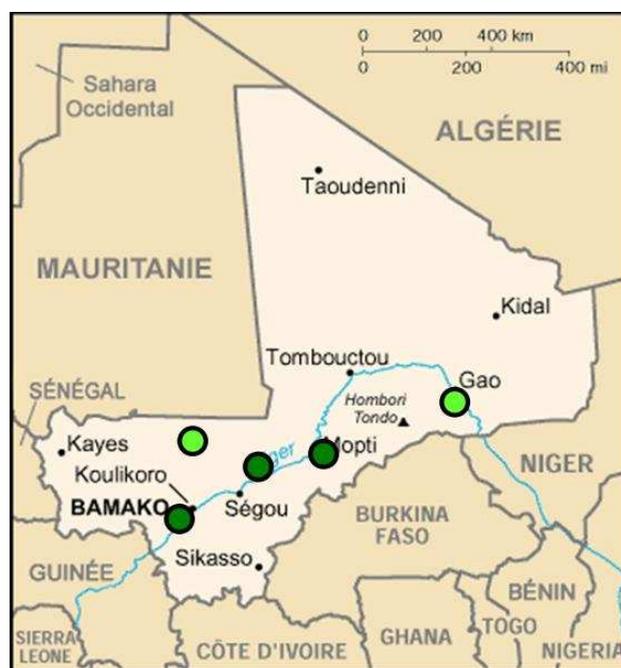
Les touaregs consomment en effet couramment des aliments secs car ils sont bien adaptés à leurs conditions de vie ; la spiruline séchée peut être stockée, ce qui est rassurant et évite des allers-retours trop contraignants.

Deux personnes, l'instituteur d'Agharous et l'adjoint d'Issouf Maha, ont été formés par Pierre Ancel (CODEGAZ) et se sont engagés à assurer bénévolement le contrôle et la supervision de la culture. Ils ont à leur tour formé un jeune homme pour assurer les tâches courantes (entretien et nourriture des bassins, récolte de la spiruline).

En mai de la même année, la productivité était de près de 9 g/jour/m². Les récoltes sont distribuées gratuitement aux familles d'Agharous [311]. Ces deux bassins pilotes ont une double vocation, expérimentale et pédagogique.

A l'époque, Issouf Maha souhaitait que le Centre d'agro-écologie dispose, dans l'avenir, d'une ferme de spiruline autonome. Il a proposé aux responsables des projets africains de les aider à se fournir en natron à bas prix, produit à Tegguida n'Tessoum, à 100 km d'Agharous.

10.1.4 MALI



les points en vert foncé représentent les programmes déjà réalisés ;

les points en vert clair représentent des projets.

Figure 86 : Carte du Mali . © Antenna technologies France

- **village de Safo** (15 km au nord de Bamako)

Les partenaires du programme sont : la Commune rurale de Safo (figure 86), l'association Cab Démé So (association malienne d'appui au développement rural), ATF et CODEGAZ. L'objectif est de participer à la lutte contre la malnutrition en produisant 900 kg de spiruline sèche par an en fin de projet, ce qui permettrait de soigner 9 000 enfants. Le projet s'est déroulé en 3 phases : constructions de bassins dont la surface totale atteint 50 m² puis 250 m² et à terme, 450 m².

En parallèle, le projet participe à la formation du personnel d'exploitation, à la sensibilisation des populations et des agents de santé à l'usage de la spiruline et à sa diffusion.

Au mois de mai 2007, la phase 2 était terminée et la période d'accoutumance et de formation se terminait.

Depuis, la production mensuelle est de 35 kg, ce qui correspond à 420 kg/an. Il est prévu d'améliorer ce chiffre, de façon à atteindre l'objectif de 500 kg/an [312].

La spiruline produite est diffusée aux centres de santé communautaire de la région, aux enfants de l'école de Safo, à des associations et à des particuliers de Safo et de Bamako. Plusieurs actions de promotion ont déjà eu lieu, notamment à l'occasion d'évènement tels que le Forum Social ou le Salon de l'Agriculture de Bamako.

La décision de lancer la troisième phase devait être prise à la fin du mois d'août 2007.

- **village de Sansanding** (50 km au nord de Ségou)

Le projet a débuté avec la construction de deux bassins de 25 m² ; à terme, il est prévu que la surface de production soit de 350 m².

La spiruline est actuellement distribuée au Centre de santé communautaire de Sansanding et au service pédiatrique de l'hôpital de Markalla (20 km). Lorsque la productivité sera suffisante, l'objectif est d'en vendre une partie sur le marché de Ségou.

Les partenaires financiers du projet sont : la Fondation Alta Mane, l'association Spiruline Équitable et Vivendi Universal.

A la fin du mois de juin 2007, la surface de culture (150 m²) permettait une production mensuelle encourageante de 27 kg. La prochaine étape d'extension devait se décider à l'automne 2007 [312].

- **Mopti**

L'initiative du projet revient à l'association franco-malienne *AU FIL DE LA VIE*, laquelle lutte contre le NOMA, terrible maladie assimilable à une lèpre du visage. Elle touche les enfants présentant un état de malnutrition et souffrant de certaines infections buccales.

La spiruline, grâce à sa remarquable composition en micro-nutriments peut corriger les carences alimentaires qui favorisent l'apparition de cette maladie et également accroître les défenses immunitaires de l'organisme des enfants.

Les autres partenaires du programme sont : la ville de Mopti, ATF, l'association Cab Démé So et le Fonds FSD du SCAC de l'Ambassade de France au Mali.

Le projet est récent ; il vise à construire des d'installations de production de spiruline (330 m² puis 600, 900 et à terme 1 200m² de surface totale), à sensibiliser la population et les agents de santé à l'usage de la spiruline et à la diffuser [312].

A la fin de l'année 2007, la surface de culture devait être égale à 330 m², permettant le traitement de 6 500 enfants (2 g/jour pendant 6 semaines) par an.

Le terme de ce projet est prévu pour juillet 2009 : l'installation de 1 200 m² devrait employer 15 personnes et permettre de traiter 24 000 enfants par an.

10.1.5 MADAGASCAR



Figure 87 : Carte de Madagascar. © Madascope.com

▪ Morondava

Financés par CODEGAZ, TECHNAP et le diocèse de Morondava à l'ouest de Antananarivo (figure 87), deux bassins de 12 et 30 m² ont été installés fin 2001. En raison des risques d'inondation, ces bassins sont surélevés à 70 cm au dessus du sol. La souche utilisée pour l'ensemencement est la *Paracas* et la production (initiale) s'est révélée élevée : 10 g / jour / m² [313].

La surface de culture s'est ensuite progressivement étendue pour atteindre 500 m² en 2005. C'est le diocèse qui l'exploite, pour le compte des religieuses qui assurent les soins quotidiens des populations démunies.

Cette surface a permis le traitement en 2005 d'environ 5000 enfants malnutris accueillis au sein du dispensaire.

Par ailleurs, il est important de signaler que, dans ce pays, la spiruline a fait ses preuves en tant que complément alimentaire permettant de réduire les conséquences de la malnutrition ; elle est reconnue par les autorités médicales et gouvernementales malgaches (visite du Président de la République de Madagascar).

- **Tuléar**

ANTENNA Technologies a aidé au financement de la construction de 40 m² de bassins de spiruline au domicile de Mme Vololonavalona, laquelle travaille à l'IHSM (Institut Halieutique des Sciences Marines) basé à Toliara (figure 104). Maître de conférence, elle a soutenu en 2002, une thèse de doctorat sur les lacs à spiruline de la région.

En 2004, elle a encadré sur le terrain, les travaux de recherche menés par Tsarahevitra Jarisoa. Cet élève malgache a réalisé une thèse sur la culture des spirulines dans l'eau salée, sous la direction de L. Charpy (directeur des recherches à l'Institut de Recherche pour le Développement à Paris) et de N. Vicente (Université Aix-Marseille I). Il était également encadré par R. Fox et J.P. Jourdan. L'objectif final de sa thèse, soutenue fin 2004, était de proposer un système de culture des spirulines en eau de mer, viable dans les conditions de Madagascar [313].

Les bassins sont en béton, sous toiture et ombrage. Une partie de leur production est destinée au dispensaire des Assomptionnistes de Tuléar.

- **Antsirabé** (2^{ème} ville de Madagascar, 250 km au sud de Tananarive)

Plusieurs membres d'ATF se sont réunis pour fonder en 2005, une émanation de cette association : ANTENNA Technologies Antsirabé (ATA). Durant leurs précédents séjours malgaches, ils avaient pu constater la détresse liée à la malnutrition dans cette région.

Le but de cette association malgache est donc de monter des projets de culture de spiruline dans la région des Hauts Plateaux de Madagascar, afin de lutter contre la malnutrition rencontrée localement. La ferme de production se trouve à Ibity, à quelques kilomètres au sud d'Antsirabé (figure 88) [314].

Le rôle d'ATA est d'assurer l'équilibre financier pour permettre la pérennité des installations et la rétribution du personnel exploitant. Les futurs exploitants et les étudiants qui préparent un diplôme ou une thèse sur ce sujet, sont formés gratuitement.

Son but final est de faire en sorte que les acteurs locaux se prennent en charge et assurent leur avenir.

A noter que l'implantation de spiruline à cet endroit constitue un défi technique car cette région est la plus froide de Madagascar ; les quelques producteurs existant préférant se cantonner dans des régions climatiquement plus favorables (Sud Ouest de Madagascar), personne n'avait encore osé tenter cette expérience à cet endroit [315].

Les efforts ont été récompensés puisque non seulement la culture a réussi, mais d'autres centres de production ont vu le jour dans le secteur.

La première phase du projet a abouti sur la construction de 120 m² de bassins dans le village d'Ibity, à proximité de l'usine cimentière de HOLCIM, laquelle est le principal partenaire d'ATA ; cette proximité a été choisie pour faciliter l'approvisionnement en eau et en énergie électrique.



Figure 88 : Ferme de production de spiruline à Ibity. © Antenna

Au début de l'année 2007, le potentiel de production de la ferme était de 200 kg de spiruline sèche par an, permettant le traitement de 2 000 enfants.

Un tiers de cette production est fournie gratuitement à des associations s'occupant d'enfants malnutris. Parallèlement, les effets de la spiruline sur ces enfants sont contrôlés par le biais d'un suivi médical. La distribution a lieu sous forme de gélules, mais également en chapelets de berlingots de doses de 2 ou 3 g.

Les deux-tiers restants sont vendus pour assurer l'équilibre financier de l'association ATA, bien qu'en dehors des trois salariés de l'exploitation, toutes les interventions soient du bénévolat total. Ce projet a effectivement permis l'embauche de trois personnes : deux techniciens et un technicien formateur-coordonateur régional.

La ferme constitue également un centre de formation des techniciens, de développement et de diffusion de la technologie [315].

Une extension de 30 m² a récemment pu être réalisée grâce au financement du Lions club France Australe. Au mois de juin 2007, la surface totale d'exploitation est donc passée à 240 m². Une nouvelle extension de 150 m² était prévue durant le second semestre 2007. L'objectif des membres d'ATA est de subvenir aux besoins de 10 000 enfants en 2008.

Quatre autres fermes ont été implantées en 2006, au sein d'autres associations et congrégations d'Antsirabé [315] :

- à Ambahano : 30 m² de bassins sont opérationnels depuis janvier 2006 ; l'objectif est de produire 38 kg de spiruline par an pour subvenir aux besoins de 450 enfants souffrant de malnutrition, accueillis au centre des Enfants du Soleil à Antsirabé ou dans des centres nutritionnels dont ils ont la charge.

- à Mahazina : 30 m² de bassins assurent une production de spiruline depuis juin 2006. Le projet est soutenu par les associations *Zazakely* et *SOS Enfants* ; le porteur du programme est l'association *Vonjiaina*.
- à Ambano : 60 m² de bassins sont opérationnels depuis septembre 2006. Le porteur du programme est la congrégation des sœurs de Notre Dame de la Salette. L'objectif est de produire 76 kg de spiruline par an pour subvenir aux besoins de 900 enfants.
- à Amadea : la surface de production prévue est de 60 m² ; les travaux ont commencé en février 2007. L'objectif est également de produire 76 kg de spiruline par an pour subvenir aux besoins de 900 enfants.

10.1.6 Autres lieux de productions locales africaines [316]

➤ **REPUBLIQUE CENTRAFRICAINE**

- Unité de production de Bangui (avec pour partenaire Kénose-ANTENNA)

➤ **REPUBLIQUE DEMOCRATIQUE du CONGO**

- Unité de production de Goma
- Unité de production de Kinshasa
- Unité de production d'Uvira
- Unité de production de Rutshuru
- Unité de production de Butembo

toutes ont pour partenaire ANTENNA Technologies Grands Lacs
--

➤ **SENEGAL**

- Unité de production de Bambey (ATF)

➤ **BURUNDI**

- Unité de production de Nyanzalac (AT)
- Unité de production de Rumonge (AT)
- Unité de production de Kaniosha (AT)

➤ **KENYA**

- Unité de production de Mombassa (AT)

➤ **CAMEROUN**

- Unité de production de Maroua (AT)

➤ **TOGO**

- Unité de production de Lomé (AT)

10.2 Asie

➤ INDE du Sud



Figure 89 : Carte de l'Inde. Division Géographique de la Direction des Archives du Ministère des Affaires Etrangères © 2004

L'Inde n'est plus classée parmi les PVD ; elle fait actuellement partie des pays dits "émergents".

▪ Madurai

L'Ecopark, situé à 12 km de Madurai (figure 89), a été mis en place, il y a 7 ans, par ANTENNA Genève.

La production, d'environ 100 kg/mois grâce aux 525 m² de bassins, permettait une distribution de spiruline à 2 000 enfants issus des villages et des camps de réfugiés. D'autres bassins ont été ajoutés ensuite, portant la surface totale d'exploitation à 810 m², ce qui correspond à une production mensuelle d'environ 150 kg.

A noter qu'une installation industrielle de production de spiruline, destinée en partie à l'exportation, est implantée à 40 km de Madurai.

Elle ne pose pas de problème de concurrence car les coûts de production sont plus bas dans les structures artisanales, à condition de maintenir une productivité de 7 à 8 g/j/m² [317].

▪ Pondichéry

Cette ville fait partie d'un groupe de 50 communautés internationales choisies par l'*International Institute for a Sustainable Development* pour leur réussite dans une dizaine d'activités jugées prioritaires par les Nations Unies. Elle bénéficie notamment de 25 ans d'expérience en matière de développement d'activités agro-écologiques.

Au début des années 1990, Bonaventure Chanson a fondé la "Simplicity's Spirulina Farm". Après avoir collecté de nombreuses informations sur la spiruline, il a ensuite effectué d'importantes expérimentations en laboratoire. Parallèlement à ses recherches, il a introduit la consommation de spiruline à l'intérieur de la communauté.

Depuis 1997, sous la direction de l'ingénieur hollandais Hendrick, "Simplicity" produit de la spiruline pour la consommation des habitants de Pondichéry et également pour la vente à l'extérieur.

La communauté possède 10 bassins en ciment de 30 m² chacun et aussi quelques bassins en plastique selon le modèle de Madurai (figure 90).

La production moyenne est actuellement de 450 kg par an, ce qui permet de fournir un complément alimentaire pour 1 370 personnes [317].

La spiruline fraîche est distribuée aux enfants, l'autre partie de la récolte est vendue 20\$/ kg (prix de vente unique, quelque soit la quantité par paquet).

A noter que cette ferme assure aussi un rôle de formation et de conseil en faveur de l'installation d'autres unités du même type.



Figure 90 : Femme récoltant la spiruline cultivée dans les bassins de la ferme "Simplicity". @ spirulinefrancefree.fr [318]

10.3 Amérique du sud

➤ Chili

A noter que le Chili est également classé dans les pays émergents.

Francisco AYALA est un spécialiste chilien qui totalise 25 ans d'expérience au sujet de la spiruline. En 1990, grâce aux soutiens d'ACMA et d'autres organismes dont l'association *Solidarité Mondiale contre la Faim*, il a installé dans le village de LA HUAYCA (province d'Atacama, figure 91), sous l'appellation "SOLARIUM", une production semi-intensive de spiruline (figure 92) [319].

Actuellement, l'entreprise Solarium compte 3 hectares de bassins. Une partie de la production est exportée pour être vendue aux pays industrialisés et l'autre partie est offerte aux pays du Tiers-Monde qui ne disposent pas encore de culture locale.

Après 17 années de terrain à différents niveaux de production (artisanal, semi-industriel et industriel), cette entreprise dispose d'un savoir faire suffisant pour développer des projets de production de Spiruline partout où les conditions climatiques et basiques permettent la croissance de la spiruline. L'équipe a également étudié les facteurs de réussite d'un projet de production semi-industrielle et industrielle [320].



Figure 91 : Carte du Chili. © Routard.com



Figure 92 : Photographie montrant des bassins de l'exploitation Solarium.
© spirulinefrancefree.fr

Conclusion

En 2008, malgré les importants moyens déployés par la communauté internationale et les différents états depuis plusieurs décennies, le problème de la malnutrition protéino-énergétique continue à se poser avec acuité dans les pays en voie de développement. D'un autre côté, tous les pays industrialisés connaissent aussi des déséquilibres alimentaires, mais les répercussions sur la santé sont différentes, se manifestant à plus long terme.

Face aux grands défis du monde actuel (mondialisation, maîtrise de l'énergie, protection de l'environnement, lutte contre l'infection à VIH/SIDA...), il est urgent de trouver des solutions efficaces et économiquement adaptées aux populations des pays concernés.

La spiruline semble bien être une solution envisageable avec sérieux :

- d'une part, sa culture et sa conservation sont compatibles avec les conditions climatiques des pays du Sud, ceci pouvant se faire en tenant compte des ressources locales (eau, intrants, moyens techniques et financiers, facteurs humains).
- d'autre part, sa composition nutritive exceptionnelle, la biodisponibilité de ses constituants, son acceptabilité et son absence de toxicité représentent des intérêts certains pour les programmes de réhabilitation nutritionnelle. Les études déjà réalisées montrent de manière évidente que la spiruline (5 à 10 g par jour) peut être d'une grande utilité, même si elle ne peut, à elle seule, constituer la solution unique à la malnutrition.

Depuis quelques années, plusieurs organisations non gouvernementales ont donc intégré la spiruline dans leurs programmes de lutte contre la malnutrition, tout en essayant d'assurer la formation d'autochtones capables d'assumer une production locale autonome.

Certes, certaines fermes ont montré qu'il était possible de rentabiliser économiquement une exploitation à but social et de réaliser un "profit humanitaire" (Nayalgue au Burkina, Pahou au Bénin, Ibity à Madagascar), mais il n'en demeure pas moins que sur le plan financier, les organisations gouvernementales et intergouvernementales sont nécessaires pour accompagner ces associations dans leur démarche.

Toutefois, on constate que la spiruline est toujours ignorée des stratégies de lutte proposées par les nutritionnistes et les professionnels de santé œuvrant pour l'UNICEF ou la FAO. La première chose à faire est donc de convaincre ces personnes des bénéfices apportés par la consommation de spiruline, en complément des repas traditionnels.

Par ailleurs, la culture de la spiruline est possible en respectant l'environnement ; elle pourrait même participer, dans une certaine mesure, à la réduction de la quantité de certains gaz à effet de serre émis dans l'atmosphère.

En effet, consommatrice de dioxyde de carbone et productrice d'oxygène lors de sa croissance, la spiruline présente un intérêt évident dans le cadre des mesures fixées lors du dernier Grenelle de l'environnement (octobre 2007). De plus, sa culture fait aussi appel à des formes d'énergies nouvelles, participant ainsi à la maîtrise de l'énergie (séchoirs solaires, panneaux photovoltaïques).

Parallèlement à la culture artisanale de spiruline dans les pays en développement, de grands groupes chinois, américains ou indiens se sont lancés dans sa culture industrielle, dans le but de la commercialiser dans les pays riches, à des prix pouvant atteindre 400 €/le kg.

Dans ces pays, la spiruline est loin d'être indispensable ; elle constitue un produit de confort le plus souvent utilisé par les sportifs, ou un complément alimentaire capable de pallier à la malnutrition par déséquilibre des apports nutritionnels, aux états de fatigue et au manque d'appétit.

Depuis quelques années, les études cliniques réalisées sur les animaux ou l'Homme se sont multipliées. Dirigées par des chercheurs de différents pays, elles suggèrent que la spiruline ou ses extraits exerceraient diverses actions thérapeutiques préventives voire curatives.

Dans le but d'explorer à fond tous les trésors qu'elle recèle et de lui attribuer enfin des bénéfices réels, il me paraît donc indispensable d'envisager les perspectives suivantes :

- Investir dans la recherche sur les techniques de culture, de façon à trouver des solutions optimales à moindre coût pour chaque étape de la production (et jusqu'à la distribution), toujours dans un souci du respect de l'environnement ;
- Vulgariser sa production artisanale ;
- Produire à plus grande échelle afin de réduire les coûts de production ;
- Poursuivre les recherches cliniques avec la rigueur exigée par la communauté scientifique et médicale, afin de préciser et valider l'existence de propriétés thérapeutiques exploitables en médecine et en diététique.

Des fonds seront nécessaires si on veut établir avec certitude les différentes indications et préciser les modalités concernant l'emploi de la spiruline ou de ses extraits chez l'Homme, en fonction de son âge et de son état physiopathologique ;

- Promouvoir ensuite son utilisation dans les programmes nationaux de lutte contre la malnutrition ;
- Développer des techniques moins coûteuses d'extraction de ses composés actifs spécifiques (phycocyanine, calcium-spirulan) ;
- Poursuivre les recherches concernant son utilité dans la réduction des gaz à effet de serre.

Puisse mon travail être un vecteur de diffusion de la spiruline partout où elle pourrait aider l'être humain et notre Planète.

Annexes

Annexe 1 : Photographies représentant différentes souches de spirulines [8]

© Antenna Technologies 2004-2007



Forme ondulée type "Paracas"



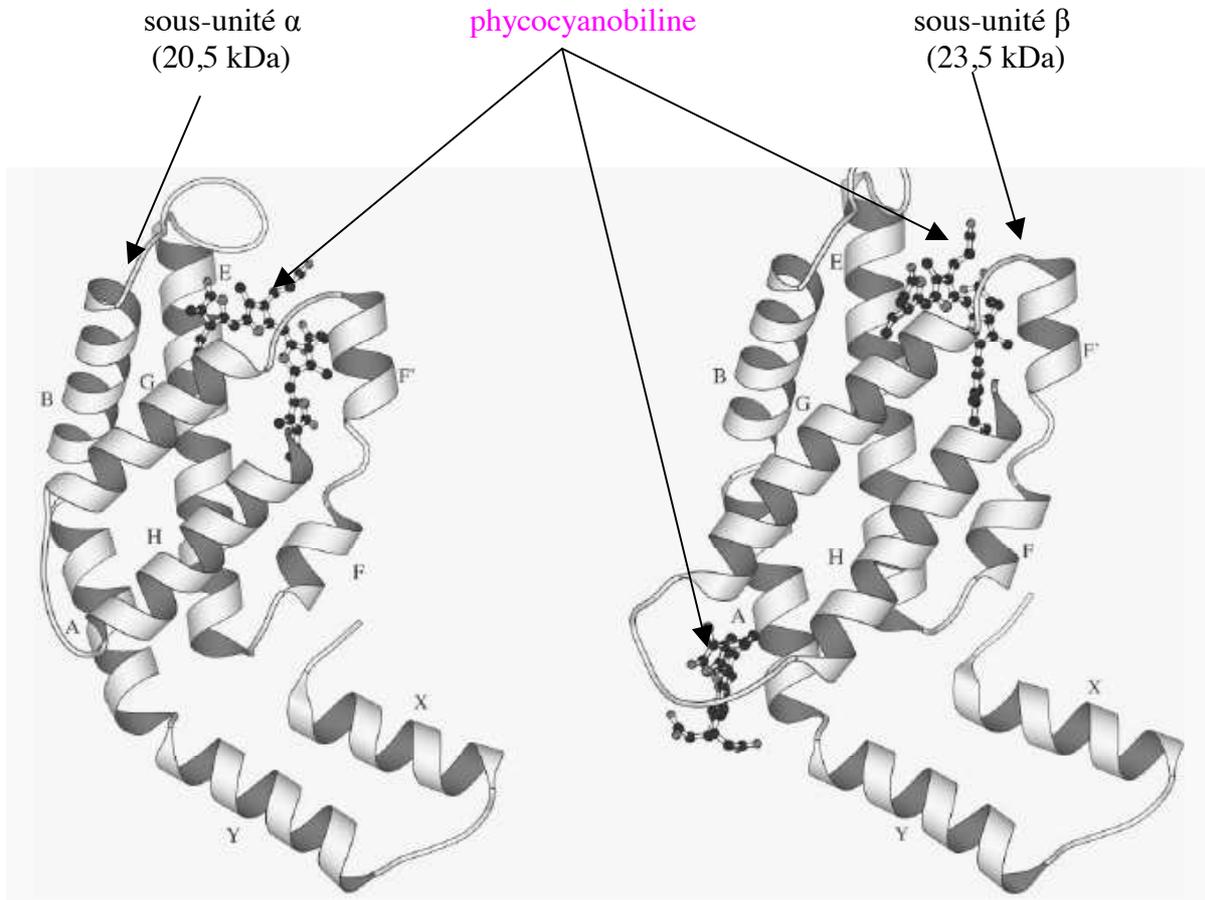
Forme spiralée type "Lonar"



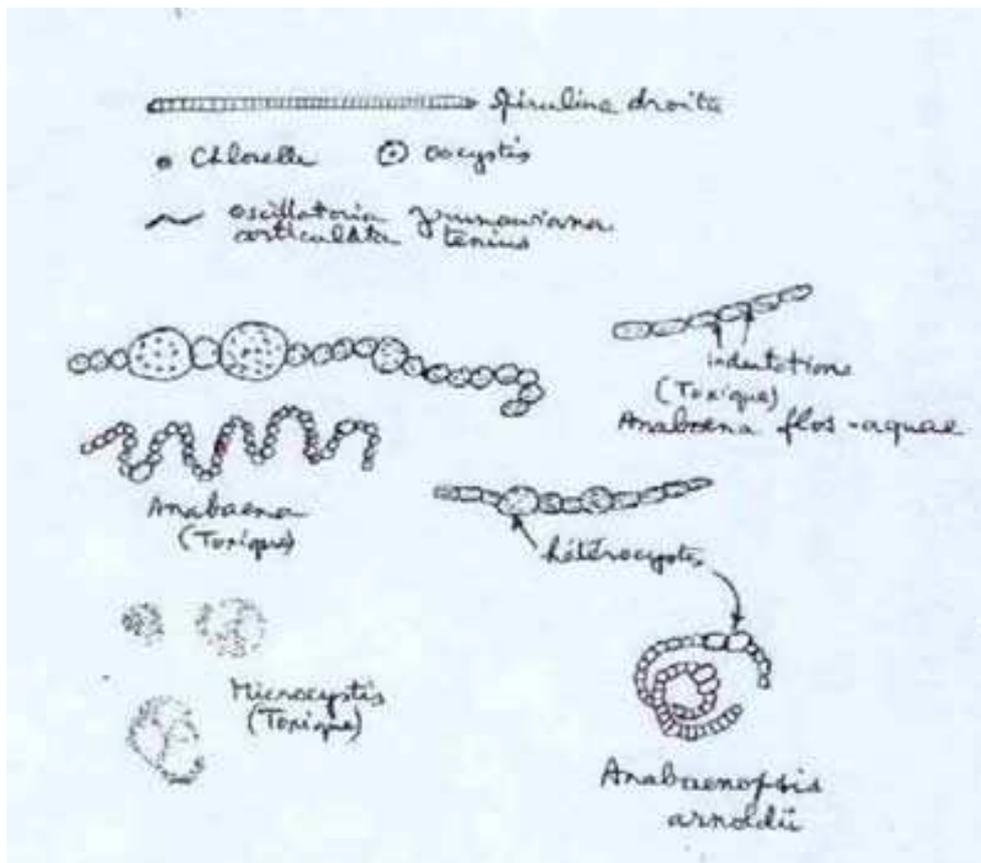
Forme droite type M2

[échelle : 2,5 cm représentent 0,1 mm]

ANNEXE 2 : Structure biochimique de la phycocyanine [56]



ANNEXE 3 : Planche pour comparer les spirulines à d'autres algues [29]



© Jean-Paul Jourdan

**ANNEXE 4 : Estimation de la production de spirulines (exprimée en tonnes)
à travers le monde, entre les années 1975 et 1999.**

World Spirulina Production 1975-1999
Estimates are based on a world survey of researchers and producers 1993-1996 and updated through 1999.

Year	Africa / Chad*	Burma (Myanmar)	S.Am/ Chile/ Brazil	China	Cuba	India / Bangladesh	Japan	Mexico	Taiwan	Thailand	Vietnam	USA / California	USA / Hawaii	Total
1975	30	0	0	0	0	0	0	0	20	0	0	0	0	50
1976	30	0	0	0	0	0	5	45	0	0	0	0	0	80
1977	30	0	0	0	0	0	11	65	4	0	0	0	0	110
1978	30	0	0	0	0	0	20	145	4	1	0	0	0	200
1979	30	0	0	0	0	0	20	200	9	50	0	1	0	310
1980	30	0	0	0	0	0	20	245	14	50	0	1	0	360
1981	30	0	0	0	0	0	30	250	19	50	0	1	0	360
1982	30	0	0	0	0	0	35	250	25	60	0	20	0	420
1983	30	0	0	0	0	0	45	250	25	60	0	50	0	450
1984	30	0	0	1	0	0	47	250	60	75	0	55	2	520
1985	30	0	0	1	0	0	53	250	60	100	1	55	10	560
1986	30	0	0	1	0	1	60	250	60	110	3	55	20	590
1987	30	0	0	3	0	3	60	250	60	110	4	70	40	630
1988	30	0	0	3	0	3	60	250	80	110	4	70	50	660
1989	30	0	0	8	0	6	50	250	80	110	6	70	60	670
1990	30	0	0	8	0	7	35	250	90	120	0	120	80	740
1991	30	4	1	8	0	7	20	250	90	120	0	160	100	790
1992	30	12	4	12	0	12	20	250	90	120	0	160	120	830
1993	30	15	5	20	2	20	20	225	90	120	3	160	120	830
1994	30	20	5	50	10	80	20	100	90	130	5	210	160	910
1995	30	25	7	120	20	150	20	0	90	150	8	370	250	1240
1996	30	30	20	250	40	250	20	0	90	150	10	480	400	1760
1997	30	60	40	500	40	300	20	0	100	150	10	500	450	2200
1998	30	80	40	650	50	350	20	20	100	150	10	400	400	2300
1999	30	100	40	780	50	350	20	20	100	150	10	400	400	2450

* Africa / Chad: represents traditional lake harvest by indigenous people.

© 2000 Robert Henrikson, Ronore Enterprises, Inc.

ANNEXE 5 : Analyse et composition de la poudre de spiruline produite à Earthrise Farm © Copyright 2004 ENI.

Physical Properties						General Analysis	
Composition	100% Spirulina					Protein	55 - 70 %
Appearance	fine powder					Carbohydrates	15 - 25 %
Color	dark blue-green					Fats (Lipids)	06 - 08 %
Odor and Taste	mild like seaweed					Minerals (Ash)	07 - 13 %
Bulk Density	0.35 to 0.60 kg/liter					Moisture	03 - 07 %
Particle Size	64 mesh through					Fiber	08 - 10 %

Amino Acids

Essential Aminos	per 10g	% total			Essential Aminos	per 10g	% total
Isoleucine	350 mg	5.6 %			Phenylalanine	280 mg	4.5 %
Leucine	540 mg	8.7 %			Threonine	320 mg	5.2 %
Lysine	290 mg	4.7 %			Tryptophan	90 mg	1.5 %
Methionine	140 mg	2.3 %			Valine	400 mg	6.5 %

Non-Essential	per 10g	% total			Non-Essential	per 10g	% total
Alanine	470 mg	7.6 %			Glycine	320 mg	5.2 %
Arginine	430 mg	6.9 %			Histidine	100 mg	1.6 %
Aspartic Acid	610 mg	9.8 %			Proline	270 mg	4.3 %
Cystine	60 mg	1.0 %			Serine	320 mg	5.2 %
Glutamic Acid	910 mg	14.6 %			Tyrosine	300 mg	4.8 %

Total Amino Acids : 6.2 grams per 10 grams

Vitamins (per 10 grams / % U.S. Daily Value)

Vitamins	per 10g	USDV	%DV	Vitamins	per 10g	USDV	%DV
Vitamin A	23000IU	5000IU	460 %	B1 Thiamine	.35 mg	1.5 mg	23 %
Beta Carotene	14 mg	3 mg	460 %	B2 Riboflavin	.40 mg	1.7 mg	23 %
Vitamin C	0 mg	60 mg	0 %	B3 Niacin	1.4 mg	20 mg	7 %
Vitamin D	1200 IU	400 IU	300 %	B6 Pyridoxine	80 mcg	2.0 mg	4 %
Vitamin E	1.0 mg	30 IU	3 %	Folate	1 mcg	0.4 mg	0 %
Vitamin K	200 mcg	80 mcg	250 %	B12 Colobalimine	20 mcg	6 mcg	330 %
Biotin	0.5 mcg	0.3 mg	0 %	Pantothenic Acid	10 mcg	10 mg	1 %
Inositol	6.4 mg	*	* %				

Minerals (per 10 grams / % U.S. Daily Value)

Minerals	per 10g	USDV	% DV	Minerals	per 10g	USDV	% DV
Calcium	70 mg	1000 mg	7 %	Manganese	0.5 mg	2 mg	25 %
Iron	15 mg	18 mg	80 %	Chromium	25 mcg	120 mcg	21 %
Phosphorus	80 mg	1000 mg	8 %	Molybdenum	* mcg	75 mcg	* %
Iodine	* mg	150 mcg	* %	Chloride	* mg	3400 mg	* %
Magnesium	40 mg	400 mg	10 %	Sodium	90 mg	2400 mg	4 %
Zinc	0.3 mg	15 mg	2 %	Potassium	140 mg	3500 mg	4 %
Selenium	10 mcg	70 mcg	14 %	Germanium	60 mcg	* mg	* %
Copper	120 mcg	2 mg	6 %	Boron	* mg	* mg	* %

Natural Pigment Phytonutrients (per 10 grams / % total)

Pigments	Color	per 10g	% spirulina
Phycocyanin	Blue	1400 mg	14 %
Chlorophyll	Green	100 mg	1.0 %
Carotenoids	Orange	47 mg	.47%

Natural Carotenoids (per 10 grams / % total)

Pigments	Color	%	per 10g	% spirulina
Carotenes	Orange	54 %	25 mg	0.25 %
>>>Beta carotene		45 %	21 mg	0.21 %
>>>Other Carotenes		9 %	4 mg	0.04 %
Xanthophylls	Yellow	46 %	22 mg	0.22 %
>>>Myxoxanthophyll		19 %	9 mg	0.09 %
>>>Zeaxanthin		16 %	8 mg	0.08 %
>>>Cryptoxanthin		3 %	1 mg	0.01 %
>>>Echinenone		2 %	1 mg	0.01 %
>>>Other Xanthophylls		6 %	3 mg	0.03 %
Total Carotenoids	Orange/Yellow	100 %	47 mg	0.47 %

Natural Phytonutrients (per 10 grams / % total)

Phytonutrient	Composition	per 10g	% spirulina
Gamma Linolenic Acid	Essential Fatty Acid	130 mg	1.3 %
Glycolipids	Lipid	200 mg	2.0 %
Sulfolipids	Glycolipid	10 mg	0.1 %
Polysaccharides	Carbohydrate & Sugar		

ANNEXE 6 : Composition de 100g de SPIRULINA GREEN-A [109]



100G GREEN-A SPIRULINA*

GENERAL COMPOSITION		NONESSENTIAL AMINO ACIDS	
ENERGY	1350Kj	ALANINE	5.23g
PROTEIN	65.9%	ARGININE	4.18g
CARBOHYDRATE	18%	ASPARTIC ACID	6.43g
FAT,total	4.5%	CYSTEINE	0.63g
NATURAL PIGMENTS		GLUTAMIC ACID	9.32g
CHLOROPHYLL	915mg	GLYCINE	3.34g
CAROTENOIDS	225mg	HISTIDINE	1.09g
PHYCOCYANIN	4750mg	PROLINE	2.48g
MINERALS		SERINE	3.44g
CALCIUM	59.5mg	TYROSINE	3.24g
IRON	57.9mg	VITAMINS	
MAGNESIUM	315mg	VITAMIN B ₁	305mcg
MANGANESE	2.26mg	VITAMIN B ₂	3.89mg
ZINC	4.39mg	VITAMIN B ₃	2.78mg
POTASSIUM	578mg	VITAMIN B ₆	187mg
SELENIUM	42mcg	VITAMIN C	59mg
CHROMIUM	298mcg	VITAMIN E	9.1mg
ESSENTIAL AMINO ACIDS		FOLIC ACID	80mcg
ISOIEUCINE	3.86g	OTHERS	
LEUCINEG	5.94g	GAMMA-LINOLENIC ACID	111mg
LYSINE	3.11g	POLYSACCHARIDE	3.89g
METHIONINE	1.52g		
PHENYLALANINE	3.08g		
THREONINE	3.30g		
TRYPTOPHAN	0.96g		
VALINE	4.40g		

*Green-A Spirulina grown by Green-A Co. in Lake Chenghai.



TYPICAL

ANALYSIS

Copyright© 2005 Inter'China.All Rights Reserved

**Annexe 7 : Analyse et composition de *Spirulina pacifica* (poudre et comprimés)
produite par Cyanotech [120]**

Physical Properties (poudre)	Spirulina Pacifica™ is a free-flowing green to bluish-green powder. It has a mild seaweed odor and is not soluble; it forms a suspension. The Particle is <125 microns and Bulk Density is >0.48 (g/ml).
Typical Composition (poudre)	Protein: > 52 % Moisture: < 7.0 % Minerals: < 14 % Total carotenoids: > 4200 mg/kg Beta-carotene: > 2000 mg/kg Phycocyanin (crude): > 11 % C-phycocyanin: > 5 %
Quality Control (poudre)	Total aerobic bacteria: < 10 ⁵ cfu/gram Total coliforms: < 10 cfu/gram <i>E. coli</i> : negative Pesticides: negative Arsenic: < 0.5 ppm Cadmium, Lead: < 0.2 ppm each Mercury: < 0.025 ppm <i>Salmonella</i> : negative <i>Staphylococcus aureus</i> : negative

Manufacturing (comprimés)	Tablets are cold-pressed and manufactured in accordance with NPA-Good Manufacturing Practices, and in accordance with local and State of Hawaii regulations. Silica (1%), chicory inulin (0.4%), and magnesium stearate (0.1%) are used as tableting aids. Cyanotech holds a current Food Establishment Permit issued by the State of Hawaii and operates under an ISO 9001:2000 Quality Management System.
----------------------------------	---

Typical Composition (comprimés)	Property	Limits
	Protein	> 52 %
	Moisture	< 7 %
	Minerals	< 17 %
	Beta-carotene	> 1600 mg/kg
	Total Carotenoids	> 3500 mg/kg
	Phycocyanin (crude)	> 10 %
	C-Phycocyanin	> 4.5 %
Quality Control (comprimés)	Property	Limits
	Total aerobic bacteria	< 10 ⁵ cfu/gram
	Total coliforms	< 10 cfu/gram
	<i>E. coli</i>	negative
	<i>Salmonella</i>	negative
	<i>Staphylococcus aureus</i>	negative
	Arsenic	< 0.5 ppm
	Cadmium	< 0.2 ppm
	Lead	< 0.2 ppm
	Mercury	< 0.025 ppm
	Pesticides	negative

Bibliographie

1. König C.
Les algues : première lignée végétale [en ligne].
c06/10/2007. [consulté le : 5/11/2006]. Disponible sur :
http://www.futura-sciences.com/fr/comprendre/dossiers/doc/t/botanique/d/les-algues-premiere-lignee-vegetale_523/c3/221/p2/
2. Roger P.A.
Les cyanobactéries : définition.
c2006. [consulté le : 3/11/2006]. Disponible sur :
<http://pagesperso-orange.fr/cyanobacteries/pages/Introduction/definition.htm>
3. Antenna Technologies.
Malnutrition. Spiruline : quelques bases scientifiques [en ligne].
c2004-2007 [consulté le : 5/11/2006]. Disponible sur :
<http://www.antenna.ch/documents/biologie.pdf>
4. Objectif Sciences.
Les spirulines pour la science, la santé et le développement [en ligne].
[consulté le : 6/11/2006]. Disponible sur :
<http://asso.objectif-sciences.com/Fiche-Pedagogique-Les-spirulines-pour-la-science-la-sante-html>
5. Fox D. et R.
Spiruline : technique pratique et promesse.
Aix en Provence : Edisud ; 1999.
6. Scheldeman P, Baurain D, Bouhy R, Scott M, Belay A, Wilmotte A. et al.
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 Microbiol Lett 1999 ; 172 (2) : 213-22.
7. Elyah A.
Quel avenir pour la spiruline ? [en ligne].
Desta promotion 2001-2003, université Montpellier II.
Mémoire bibliographique. [consulté le : 20/02/2007]. Disponible sur :
http://elyah-partenariat.iquebec.com/autres/26_biblio_spiruline.pdf
8. Jourdan JP.
Planche pour comparer les spirulines à d'autres algues [en ligne].
c2004-2007. Antenna Technologies [consulté le : 18/04/2007]. Disponible sur :
<http://www.antenna.ch/malnutrition/annexes.html>
9. Merceron M.
Cyanobactéries [en ligne].
c2006. [consulté le : 15/12/2006]. Disponible sur :
<http://www.ecosociosystemes.fr/cyanophycees.html>

10. Doumenge F, Durand-Chastel H, Toulemont A.
Spiruline, algue de vie/ Spirulina, algae of life.
Bulletin de l'Institut Océanographique de Monaco ; numéro spécial 12.
Monaco : Musée Océanographique ; 1993.
11. Merceron M.
Les bactéries photosynthétiques productrices d'oxygène [en ligne].
c2006. [consulté le : 15/12/2006]. Disponible sur :
<http://membres.lyco.fr/neb5000/BacteriologieI/Groupes Bacteriens/Bacteries photosynthetiques productrices d oxygene.htm>
12. Moreau F., Prat R.
La Photosynthèse : Localisation de la photosynthèse [en ligne].
c05/04/2005. [consulté le : 4/01/2007]. Disponible sur :
<http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/Photosynthese-cours/02-localisation.htm>
13. Moreau F., Prat R.
Qu'est-ce qu'un photosystème ? [en ligne].
c05/04/2005. [consulté le : 4/01/2007]. Disponible sur :
<http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/Photosynthese-cours/08-photosystemes.htm>
14. Moreau F., Prat R.
La Photosynthèse : Structure et fonctionnement du PSII [en ligne].
c05/04/2005. [consulté le : 4/01/2007]. Disponible sur :
<http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/Photosynthese-cours/09-PSII.htm>
15. Moreau F., Prat R.
La photosynthèse [en ligne].
c2005. [consulté le : 4/01/2007]. Disponible sur :
<http://ead.univ-angers.fr/~jaspard/Page2/COURS/Zsuite/2Photosynthese/1Photosynthese.htm>
16. Moreau F., Prat R.
La Photosynthèse : Etapes du cycle de Calvin [en ligne].
c05/04/2005 . [consulté le : 4/01/2007]. Disponible sur :
<http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/Photosynthese-cours/17-calvin-etapes.htm>
17. Moreau F., Prat R.
La Photosynthèse : Les pigments photosynthétiques [en ligne].
c05/04/2005. [consulté le : 4/01/2007]. Disponible sur :
<http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/Photosynthese-cours/04-pigments.htm>
18. Moreau F., Prat R.
La Photosynthèse : Les organismes autotrophes au carbone [en ligne].
c05/04/2005. [consulté le : 4/01/2007]. Disponible sur :
<http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/Photosynthese-cours/01-organismes.htm>

19. CIRS.
L'adaptation de la vie à l'oxygène sur la terre primitive [en ligne].
c30/10/2006.[consulté le : 25/01/2007]. Disponible sur :
http://www.futura-sciences.com/fr/sinformer/actualites/news/t/vie-1/d/ladaptation-2-la-vie-a-loxygene-sur-la-terre-primitive_9886/
20. Panigua-Michel J, Dujardin E, Sironval C.
Histoire de spiruline, communication botanique [en ligne].
c 2007.[consulté le : 24/01/2007]. Disponible sur :
<http://www.algosopnette.com/association/spiruline-redactionnel-5.html>
21. Muet B.
La spiruline : petite "spirale de l'espoir".
Bulletin du Fonds Mondial de Solidarité Contre la Faim, juin 1992. Disponible sur :
<http://www.globidar.org/solidareco/fr373.htm>
22. Dangeard P.
Une algue bleue alimentaire pour l'homme.
Actes.Soc.linn. Bordeaux 1940 ; 91 : 39-41.
23. Brandilly M.Y.
Depuis des lustres, une tribu primitive du Tchad exploite la nourriture de l'an 2000.
Sci.Aven.1959 ; 152 : 516-519.
24. Clément G.
« Production et constituants caractéristiques des algues *Spirulina platensis* et *Spirulina maxima* ».
Ann.Nutr.Aliment 1975 ; n°29 : 477-87.
25. Léonard J., Compère P.
Spirulina platensis (Gom.) Geitler, algue bleue de grande valeur alimentaire par sa richesse en protéines.
Bull.Nat. Plantentuin Belg ; 37 (1), Suppl.23.
26. Hills C.
The secrets of *Spirulina*, medical discoveries of Japanese Doctors.
University of the three press.
Boulder Creek, Californy : University of the three press ; 1980.
27. Henrikson R.
Earth food *Spirulina* : how this remarkable blue-green algae can transform your health and our planet.
Ronore Enterprises Inc, USA, 1997. Disponible sur :
<http://www.spirulinasource.com/earthfood.html>
28. Falquet J.
Malnutrition : pourquoi la spiruline ?
c2004-2007. [consulté le 26/01/2007]. Disponible sur :
http://www.antenna.ch/documents/pourquoi_spiruline.pdf

29. Jourdan J.P.
Manuel de culture de la Spiruline [en ligne].
Antenna Technologies. 2007 [consulté le : 26/01/2007]. Disponible sur :
<http://www.antenna.ch/documents/manuelJourdan2061.pdf>
30. Charpy L, Langlade MJ, Vicente N, Riva A, eds.
International Symposium on cyanobacteria for Health, Science and Development [en ligne].
CICSSD (2004) ; 3-6 mai 2004 ; Ile des Embiez, Var, France.
Institut Océanographique Paul Ricard ; 2005. 192 pp.
c2005. [consulté le : 7/01/2007]. Disponible sur :
http://www.com.univ-mrs.fr/IRD/urcyano/activites/pdf/embiez_abstracts.pdf
31. Chauveau L.
Spiruline : la bonne algue verte [en ligne].
c2004. [consulté le : 9/01/2007]. Disponible sur :
<http://www.lexpress.fr/info/sciences/dossier/complalim/dossier.asp?ida=427329&p=1>
32. Falquet J.
Spiruline : aspects nutritionnels. [en ligne].
Genève : Antenna Technologies ; 1996 [consulté le : 14/02/2007]. Disponible sur :
<http://www.technap-spiruline.org/datas/Aspects%20nutritionnels1.doc>
33. Vermorel M, Toullec G, Dumond D, Pion R.
Valeur énergétique et protéique des algues bleues spirulines supplémentées en acides aminés : utilisation digestive et métaboliques par le rat en croissance.
Ann.Nutr.Aliment 1975 ; n°29 : 535-52.
34. Flamant Vert.
Spiruline : L'Algue Bleue des Andes [en ligne].
c 2008 [consulté le : 03/01/2008]. Disponible sur :
http://www.flamantvert.fr/gamme_produits_spiruline_flamant_vert.php
35. Compagnie Tourne-Sol
La spiruline pour un monde sans famine [en ligne].
[consulté le : 6/10/2007]. Disponible sur :
<http://flore99.free.fr/spiru.html>
36. Otten J, Pitz Hellwig J, D. Meyers L.
Les apports nutritionnels de référence: le guide essentiel des besoins en nutriments[en ligne].
c27/09/1999 [consulté le : 23/07/2007]. Disponible sur :
http://www.hc-sc.gc.ca/fn-an/nutrition/reference/cons_info-guide_cons_fr.html
37. Lee J-B, Hayashit T, Hayashi K, Sankawa U.
Structural Analysis of Calcium Spirulan (Ca-SP)-Derived Oligosaccharides Using Electropray Ionization Mass Spectrometry.
J.Nat.Pord 2000 ; n° 63 (1) : 136-38.

38. Alpha-Biotech.
Dix ans de Spiruline et d'extraits bleus [en ligne].
c10/2006 [consulté le : 23/07/2007]. Disponible sur :
<http://www.spirulinet.com/>
39. Kapoor R, Metha U.
Utilization of beta-carotene from *Spirulina platensis* by rats.
Plant-foods-Hum-Nutr. 1993 ; 43 (1) : 1-7.
40. Mitchell GV, Grundel E, Jenkins M, Blakely SR.
Effect of graded dietary levels of *Spirulina maxima* on vitamins A and E in male rats.
J.Nutr 1990 ; 120 (10) : 1235-40.
41. Ross E, Dominy W.
The nutritional value of dehydrated, blue-green algae (*Spirulina platensis*) for poultry.
Poult.Sci 1990 ; 69 (5) : 794-800.
42. Gireesh T, Nair PP, Sudhakaran PR.
Studies on the bioavailabilite of the provitamin A carotenoid, beta-carotene, using human exfoliated colonic epithelial sells.
British Journal of Nutrition 2004 ; 92 (2) : 241-45 (5).
43. Harriman GR, Smith PD, Horne MK, Fox CH, Koenig S, Lack EE, Lane HC et al.
Vitamin B 12 malabsorption in patients with acquired immunodeficiency syndrome.
Arch.Intern.Med.1989 ; 149 (9) : 2039-41.
44. Rule SA, Hooker M, Costello C, Luck W, Hoffbrand AV.
Serum vitamin B 12 and transcobalamin levels in early HIV disease.
Am-J-Hematol.1994 ; 47 (3) : 167-71.
45. Watanabe F, Katsura H, Takenaka S, Fujita T, Abe K, Tamura Y et al
Pseudovitamin B 12 is the predominant cobamide of an algal health food, spirulina tablets.
J Agric.Food Chem.1999 ; 47(11) : 4736-41.
46. Todd-Lorenz R.
Spirulina Pacifica as a Source of Cobalamin Vitamin B-12.
Spirulina Pacifica Technical Bulletin N°052, 12 janv1999. Disponible sur :
<http://www.cyanotech.com/pdfs/spirulina/spbul52.PDF>
47. Planes P, Rouanet J-M.1, Laurent C, Baccou J-C, Besançon P, Caporiccio B.
Magnesium bioavailability from magnesium-fortified spirulina in cultured human intestinal Caco-2 cells.
Food Chemistry 2002 ; 77 (2) : 213-18 (6).

48. Small Biz 4 seasons.
La spiruline BIORIGIN en bref [en ligne].
c2007 [consulté le : 18/08/2007]. Disponible sur :
<http://biospirulina.ch/>
49. Kapoor R, Mehta U.
Iron status and growth of rats fed different dietary iron sources.
Plant Foods Hum Nutr 1993 b; 44: 29-34.
50. Puyfoulhoux G, Rouanet JM, Besançon P, Baroux B, Baccou JC, Kaporiccio B.
Iron availability from iron-fortified spirulina by an in vitro digestion/Caco-2 cell culture model.
J Agric.food Chem.2001 ; 49 : 1625-29.
51. Chen T, Zheng W, Wong YS, Yang F, Bai Y.
Accumulation of selenium in mixotrophic culture of *Spirulina platensis* on glucose.
Bioresour. Technol.2006 ; 97 (18) : 2260-5.
52. Li ZY, Guo SY, Lin L.
Bioeffects of selenite on the growth of *Spirulina platensis* and its biotransformation.
Bioresour. Technol.2003 ; 89 (2) : 171-76.
53. Cases J, Vacchina V, Napolitano A, Caporiccio B, Besançon P, Lobinski R et al.
Selenium from selenium-rich *Spirulina* is less bioavailable than selenium from sodium selenite and selenomethionine in selenium-deficient rats.
J Nutr.2001 ; 131(9) : 2343-50.
54. Laboratoire NATESIS
Les phytonutriments majeurs de la Spiruline [en ligne].
c2007 [consulté le : 18/08/2007]. Disponible sur :
http://www.natesis.com/boutique/page_actus_page.cfm?num_actus=3&code_lg=lg.fr
55. .Alpha-Biotech.
La Phycocyanine ? [en ligne].
c10/2006 [consulté le : 23/07/2007]. Disponible sur :
<http://www.spirulinet.com/index.php?page=phyco>
56. Alpha-Biotech.
Structure biochimique de la phycocyanine [en ligne].
c10/2006 [consulté le : 23/07/2007]. Disponible sur :
http://www.spirulinet.com/doc/Phycocyanine_fichiers/frame.htm
57. Belay A.
Mass culture of *Spirulina platensis* –The Earthrise farms Expérience.
Spirulina platensis (Arthrospira).
Londres : ED.Avigad Vonshak, Taylor&Francis ; 1997 .p.131-58.

58. Fox R.
Compte-rendu du « Mini-colloque » de Mialet sur la production de la spiruline artisanale [en ligne].
Mialet (France) ; 26-28 /06/2002. p.1-7
<http://www.com.univ-mrs.fr/IRD/urcyano/activites/pdf/spirulin.pdf>
59. Delpuech F.
Consumption as food and nutritional composition of blue-green algae among populations in the Kanem region of Chad.
Ann.Nutr.Aliment. 1976 ; 29 : 497-516.
60. Chamorro-Cevallos G.
Toxicologic Research on the Alga Spirulina.
United Nations Organisation for Industrial Development ; 24 oct 1980.
61. Boudène C, Collas E, Jenkins C.
Recherche et dosage de divers toxiques minéraux dans les algues spirulines de différentes origines, et évaluation de la toxicité à long terme chez le rat d'un lot d'algues spirulines de provenance mexicaine.
Ann.Nutr.Aliment. 1975 ; 29 : 577-87.
62. Tulliez J, Boreis G, Février C, Boudène C.
Les hydrocarbures des algues spirulines : nature, étude du devenir de l'heptadécane chez le rat et le porc.
Ann.Nutr.Aliment. 1975 ; 29 : 563-71.
63. Salazar M, Chamorro GA, Salazar S, Steele CE.
Effect of spirulinaconsumption on reproduction and peri-and postnatal development in rats.
Food Chem Toxicol. 1996 Apr ; 34(4) : 353-9.
64. Yang HN, Lee EH, Kim HM.
Spirulina platensis inhibits anaphylactic réaction.
Life Sci. 1997 ; 61 (13) : 1237-44.
65. Association Algosopnette.
Les dosages de la spiruline [en ligne].
c2003 [consulté le : 2/07/2007]. Disponible sur :
<http://www.algosopnette.com/association/spiruline-redactionnel-39.html>
66. Fox R.D.
« Spirulina, production & potential ».
Aix en Provence : Edisud ; 1996.
67. Darcas C.
La spiruline, une algue pour la santé — livret-guide de production.
TECHNAP/CREDESA 2000. Disponible sur :
<http://credsa.on line.fr>

68. Sorto M.
Voies alimentaires d'amélioration des situations nutritionnelles : utilisation et consommation de la spiruline au Tchad.
2ème Atelier international ; Ouagadougou, 23-28 /11/ 2003. Disponible sur :
http://spirulinagadez.free.fr/pdfs/Tchad_Sorto.pdf
69. Henrikson R.
Natural health food products around the world.
<http://www.spirulinasource.com/earthfoodch5c.html>
70. Algosopette.
Les Recettes à la Spiruline [en ligne].
c2008 [consulté le : 6/03/2008]. Disponible sur :
<http://www.algosopette.com/association/spiruline-redactionnel-43.html>
71. Flamant Vert.
La cuisine à la spiruline [en ligne].
c2007 [consulté le : 7/11/2007]. Disponible sur :
<http://www.flamantvert.fr/pdf/recettes-flamant-vert.pdf>
72. Sisso B.
Saveurs et vertus de la spiruline/Recettes et réflexions.
Paris : Mamaéditions.com ; 2001. 80pp
73. Darcas C.
La spiruline, une algue pour la santé- Livret guide de production.
Le site [en ligne].
cTechnap/Credesa 2000. [consulté le : 10/03/2007]. Disponible sur :
<http://credesa.online.fr/fich2.htm#1-Site>
74. Darcas C.
La spiruline, une algue pour la santé- Livret guide de production.
Bassins [en ligne].
cTechnap/Credesa 2000. [consulté le : 10/03/2007]. Disponible sur :
<http://credesa.online.fr/fich2.htm#2-Bassin>
75. ENSM Saint Etienne.
Nombre et emplacement des bassins [en ligne].
[consulté le : 26/06/2007]. Disponible sur :
<http://webelevés.emse.fr/~shilaire/spiruline/nombrebassin.html>
76. Darcas C.
La spiruline, une algue pour la santé- Livret guide de production.
Ensemencement [en ligne].
cTechnap/Credesa 2000. [consulté le : 10/03/2007]. Disponible sur :
<http://credesa.online.fr/fich3.htm#2ens>

77. Darcas C.
La spiruline, une algue pour la santé- Livret guide de production.
Agitation des bassins [en ligne].
cTechnap/Credeva 2000. [consulté le : 10/03/2007]. Disponible sur :
<http://credeva.online.fr/fich3.htm#2ens>
78. Langlade M.J.
Colloque international sur la spiruline. 1^{ère} rencontre panafricaine ; 4-10 mars 2006 ;
Niger.
[consulté le : 9/10/2007]. Disponible sur :
<http://pagesperso-orange.fr/petites-nouvelles/manuel/colloque-agharous-2006-ird.pdf>
79. Darcas C.
La spiruline, une algue pour la santé- Livret guide de production.
Première formulation [en ligne].
cTechnap/Credeva 2000. [consulté le : 10/03/2007]. Disponible sur :
<http://credeva.online.fr/fich3.htm#1formul>
80. ENSM Saint Etienne.
Constitution du milieu de départ[en ligne].
[consulté le : 26/06/2007]. Disponible sur :
<http://webelevs.emse.fr/~shilaire/spiruline/milieuinit.html>
81. Darcas C.
La spiruline, une algue pour la santé- Livret guide de production.
Disque de SECCHI [en ligne].
cTechnap/Credeva 2000. [consulté le : 11/03/2007]. Disponible sur :
<http://credeva.online.fr/fich3.htm#disk>
82. ENSM Saint Etienne.
Constitution du milieu nourricier pour l'entretien[en ligne].
[consulté le : 26/06/2007]. Disponible sur :
<http://webelevs.emse.fr/~shilaire/spiruline/entretienbassin.html>
83. Darcas C.
La spiruline, une algue pour la santé- Livret guide de production.
Les paramètres de la culture [en ligne].
cTechnap/Credeva 2000. [consulté le : 10/03/2007]. Disponible sur :
<http://credeva.online.fr/fich3.htm#7Parame>
84. Darcas C.
La spiruline, une algue pour la santé- Livret guide de production.
Problème des exopolysaccharides [en ligne].
cTechnap/Credeva 2000. [consulté le : 11/03/2007]. Disponible sur :
<http://credeva.online.fr/fich6.htm>

85. Jourdan J.P.
« Le mystère des droites »[en ligne]
c2002. [consulté le : 9/11/2007]. Disponible sur :
<http://www.com.univ-mrs.fr/IRD/urcyano/activites/pdf/spirulin.pdf>
86. Manen JF, Falquet J.
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-
7.
87. Jourdan J.P.
Compte-rendu du « Mini-colloque » de Mialet sur la production de la spiruline
artisanale [en ligne].
Mialet (France) ; 26-28 /06/2002. p.1-7.
<http://www.com.univ-mrs.fr/IRD/urcyano/activites/pdf/spirulin.pdf>
88. Darcas C.
La spiruline, une algue pour la santé- Livret guide de production.
Réponses à quelques problèmes [en ligne].
cTechnap/Credeasa 2000. [consulté le : 10/03/2007]. Disponible sur :
<http://credesa.online.fr/tablintr.htm>
89. Darcas C.
La spiruline, une algue pour la santé- Livret guide de production.
Récolte/Filtration [en ligne].
cTechnap/Credeasa 2000. [consulté le : 10/03/2007]. Disponible sur :
<http://credesa.online.fr/fich4.htm#1Recolte>
90. ENSM Saint Etienne.
Récolte de la spiruline[en ligne].
[consulté le : 26/06/2007]. Disponible sur :
<http://webeleves.emse.fr/~shilaire/spiruline/recolte.html>
91. Darcas C.
La spiruline, une algue pour la santé- Livret guide de production.
Lavage et essorage [en ligne].
cTechnap/Credeasa 2000. [consulté le : 10/03/2007]. Disponible sur :
<http://credesa.online.fr/fich4.htm#2Lavage>
92. Darcas C.
La spiruline, une algue pour la santé- Livret guide de production.
Extrusion [en ligne].
cTechnap/Credeasa 2000. [consulté le : 11/03/2007]. Disponible sur :
<http://credesa.online.fr/fich4.htm#3Extrusion>

93. Darcas C.
La spiruline, une algue pour la santé- Livret guide de production.
Séchage [en ligne].
cTechnap/Credeva 2000. [consulté le : 10/03/2007]. Disponible sur :
<http://credeva.online.fr/fich4.htm#4Sechage>
94. Belay A, Ota Y .
Production of high quality spirulina at Earthrise Farms.
in : Proc. of Second Asia Pacific Conférence on Algal Biotech. Univ. of Malaysia.
USA ; 1994.
95. ENSM Saint Etienne.
Conditionnement de la spiruline récoltée[en ligne].
[consulté le : 26/06/2007]. Disponible sur :
<http://webelevs.emse.fr/~shilaire/spiruline/conditionnement.html>
96. Darcas C.
La spiruline, une algue pour la santé- Livret guide de production.
Conditionnement/Hygiène [en ligne].
cTechnap/Credeva 2000. [consulté le : 11/03/2007]. Disponible sur :
<http://credeva.online.fr/fich4.htm#6Conditionnement>
97. Jourdan J.P.
Présentation Microsoft PowerPoint : Qualité [en ligne].
c12/2006. [consulté le : 10/08/07]. Disponible sur :
<http://pagesperso-orange.fr/petites-nouvelles/presentation-powerpoint-qualite.ppt>
98. Gonçalves de Oliveira E.
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 ; 2006.
99. Earthrise.
Origins and History [en ligne].
c2004 Earthrise Nutritionals LLC. [consulté le : 22/10/2007]. Disponible sur :
<http://www.earthrise.com/company.asp>
100. Henrikson R.
The origins of Earthrise [en ligne].
c2000. [consulté le : 22/10/2007]. Disponible sur :
<http://www.spirulinasource.com/earthfoodorigin1.html>
101. NATESIS
La force concentrée de la spiruline de Californie [en ligne].
[consulté le : 22/08/2007]. Disponible sur :
http://www.natesis.com/boutique/page_actus_page.cfm ?num_actus=1&code_1g=1g_fr

102. Henrikson R.
A guide tour of Earthrise Farms [en ligne].
c2000. [consulté le : 23/08/2007]. Disponible sur :
<http://www.spirulinasource.com/earthfoodch6a.html>
103. Spirulina Health Library.
Quality and Safety Standards [en ligne].
c2004 ENI. [consulté le : 22/08/2007]. Disponible sur :
<http://www.spirulina.com/SPLSQuality.html>
104. NATESIS
Composition générale de la spiruline Natesis [en ligne].
c10/2007. [consulté le : 22/08/2007]. Disponible sur :
http://www.natesis.com/boutique/page_actus_page.cfm?num_actus=37&code_1g=1g_fr
105. INTER'CHINA.
Origine Chenghai Lake (Yunnan) [en ligne].
c2005. [consulté le : 30/10/2007]. Disponible sur :
<http://ginsengdechine.com/>
106. INTER'CHINA.
Délicate opération de filtrage. Extraction pour analyses [en ligne].
c2005. [consulté le : 30/10/2007]. Disponible sur :
www.imporchina.com/listspirusauv-1.pdf
107. INTER'CHINA.
Origine de la Spirulina Green-A [en ligne].
c2005. [consulté le : 30/10/2007]. Disponible sur :
<http://ginsengdechine.com/spiruorigin.htm>
108. INTER'CHINA.
Origine de la spiruline sauvage de Chine [en ligne].
c2005. [consulté le : 30/10/2007]. Disponible sur :
www.imporchina.com/listspirusauv-1.pdf
109. INTER'CHINA.
Composition Spirulina Green-A [en ligne].
c2006. [consulté le : 30/10/2007]. Disponible sur :
<http://ginsengdechine.com/spiruanal.htm>
110. INTER'CHINA.
Label GREEN-FOOD [en ligne].
c2006. [consulté le : 30/10/2007]. Disponible sur :
<http://ginsengdechine.com/spiruanal.htm>
111. Wesley.net.com.
Présentation de Siam Algae [en ligne].
c2007. [consulté le : 30/10/2007]. Disponible sur :
http://wesley.net.com/thailand/profile.php?Co_code=862

112. Henrikson R.
Advanced pond cultivation systems [en ligne].
c2000. [consulté le : 5/11/2007]. Disponible sur :
<http://www.spirulinasource.com/earthfoodch6c.html>
113. Henrikson R.
Worldwide spirulina farms[en ligne].
c2000. [consulté le : 5/11/2007]. Disponible sur :
<http://www.spirulinasource.com/earthfoodch6c.html>
114. Cyanotech.
Spirulina Pacifica® [en ligne].
c2007. [consulté le : 5/11/2007]. Disponible sur :
<http://www.cyanotech.com/spirulina.html>
115. Cyanotech.
Présentation des techniques de Cyanotech [en ligne].
c2007. [consulté le : 5/11/2007]. Disponible sur :
<http://www.cyanotech.com/pdfs/spirulina/CyanotechSpirulina.pdf>
116. Cyanotech.
Company and activities [en ligne].
c2007. [consulté le : 5/11/2007]. Disponible sur :
<http://www.cyanotech.com/company.html>
117. Cyanotech.
Hawaiian Spirulina Production and Quality Control [en ligne].
c2007. [consulté le : 5/11/2007]. Disponible sur :
http://www.cyanotech.com/company/company_process.html
118. Desmorieux H., Decaen N.
Convective drying of Spirulina in thin layer.
Journal of food Engineering 2006 ; 77 : 64-70
119. Terre d'Olina.
L'emballage en verre Viosol® (en ligne).
[consulté le : 31/10/2007]. Disponible sur :
<http://www.terredolina.com/list.php?lang=1&path=124&num=34&action=n&sort=id&page=0&AdSearch=on>
120. Cyanotech.
Spirulina Pacifica® : Specifications and General Composition [en ligne].
c2007. [consulté le : 5/11/2007]. Disponible sur :
http://www.cyanotech.com/spirulina/spirulina_specs.html
121. BIORIGIN.
Spiruline Biorigin : l'algue bleue des Andes [en ligne].
[consulté le : 3/11/2007]. Disponible sur :
<http://biospirulina.ch/>

122. BIORIGIN.
La différence Biorigin [en ligne].
c2007. [consulté le : 3/11/2007]. Disponible sur :
<http://biospirulina.ch/content.php?id=6>
123. BIORIGIN.
Produits Biorigin [en ligne].
[consulté le : 3/11/2007]. Disponible sur :
<http://biospirulina.ch/content.php?id=54>
124. BIORIGIN
Gamme des produits Biorigin-spiruline [en ligne].
[consulté le : 3/11/2007]. Disponible sur :
http://www.phytolis.ch/index.php?cPath=8_19
125. Flamant Vert France.
Gamme de produits [en ligne].
c2008. [consulté le : 4/11/2007]. Disponible sur :
http://www.flamantvert.fr/gamme_produits_spiruline_flamant_vert.php
126. Alpha-Biotech.
Dix ans de spiruline et d'extraits bleus [en ligne].
c10/2006. [consulté le : 19/11/2007]. Disponible sur :
<http://www.spirulinet.com/>
127. Alpha-Biotech.
La culture de la spiruline [en ligne].
c10/2006. [consulté le : 19/11/2007]. Disponible sur :
<http://www.spirulinet.com/index.php?page=culture>
128. Alpha-Biotech.
Spilyomer [en ligne].
c10/2006. [consulté le : 19/11/2007]. Disponible sur :
<http://www.spirulinet.com/index.php?page=spilyomer>
129. Alpha-Biotech.
Spirulysat [en ligne].
c10/2006. [consulté le : 19/11/2007]. Disponible sur :
<http://www.spirulinet.com/index.php?page=spirulysat>
130. Alpha-Biotech.
Spiruline Koilon [en ligne].
c10/2006. [consulté le : 19/11/2007]. Disponible sur :
<http://www.spirulinet.com/index.php?page=spiruform>
131. Spiruline Filao.
Un cocktail d'énergie naturelle [en ligne].
[consulté le : 19/11/2007]. Disponible sur :
<http://www.spiruline-filao.com/>

132. Algosud.
Spiruline de petite Camargue : présentation [en ligne].
[consulté le : 22/11/2007]. Disponible sur :
http://www.algosud.com/pages/francais/present_fr.asp
133. Algosud.
Super spiruline [en ligne].
[consulté le : 7/11/2007]. Disponible sur :
http://www.algosud.com/pages/francais/medias_fr.asp#videos (explications sur sp
algosud)
134. Algosud.
Dossier Presse [en ligne].
[consulté le : 7/11/2007]. Disponible sur :
http://www.algosud.com/pages/francais/brochure_fr.pdf
135. Elyah A.
Quel avenir pour la spiruline ? [en ligne].
Desta promotion 2001-2003, université Montpellier II
Mémoire bibliographique. [consulté le : 20/02/2007]. Disponible sur :
http://elyah-partenariat.iquebec.com/autres/26_biblio_spiruline.pdf
136. Mag svt : projet MELISSA.
De l'espace au labo : créer un écosystème, les acteurs biologiques [en ligne].
c SCEREN-CNDP mai 2002. [consulté le : 23/07/2007]. Disponible sur :
http://www.cndp.fr/magsvt/espace/acteurs_biologiques.htm
137. Mag svt : projet MELISSA.
De l'espace au labo : créer un écosystème, les photobioréacteurs contrôlés [en ligne].
c SCEREN-CNDP mai 2002. [consulté le : 23/07/2007]. Disponible sur :
<http://www.cndp.fr/magsvt/espace/photobioreacteurs.htm>
138. Mag svt : projet MELISSA.
De l'espace au labo : créer un écosystème, les photobioréacteurs contrôlés [en ligne].
c SCEREN-CNDP mai 2002. [consulté le : 23/07/2007]. Disponible sur :
<http://www.cndp.fr/magsvt/espace/modelisation.htm>
139. Camirand G.
Les types de fibres musculaires [en ligne].
c2004. [consulté le : 15/02/2007]. Disponible sur :
<http://archimede.bibl.ulaval.ca/archimede/files/b3371f46-270f-4f1a-8c6c-3598a1b39b45/ch02.html>
140. Natesis.
La spiruline et le sport [en ligne].
c09/2006. [consulté le : 11/03/2007]. Disponible sur :
http://www.natesis.com/boutique/page_actus_page.cfm?num_actus=30&code_lg=lg_fr

141. Robin JM.
La carence en fer [en ligne].
c2006. [consulté le : 11/03/2007]. Disponible sur :
<http://www.flamantvert.fr/pdf/vegiferpro.pdf>
142. Algosopnette.
La spiruline et les sportifs [en ligne].
c2007. [consulté le : 11/03/2007]. Disponible sur :
<http://www.algosopnette.com/association/spiruline-redactionnel-30.html>
143. Isodisnatura
Tout savoir sur l'alimentation végétarienne et végétalienne [en ligne].
c2007. [consulté le : 15/02/2007]. Disponible sur :
http://www.isodisnatura.fr/nutrition_-_article.htm?ID=41
144. Algosopnette.
Spiruline et poids [en ligne].
c2007. [consulté le : 22/01/2007]. Disponible sur :
<http://www.algosopnette.com/association/spiruline-redactionnel-30.html>
145. Ballinger AB, Clark ML.
L-phenylalanine releases cholecystokinin (CCK) and is associated with reduced food intake in humans: evidence for a physiological role of CCK in control of eating. *Metabolism*. 1994 Jun ; 43(6) : 735-8.
146. Belay A, Toshimitsu K, Yoshimichi O.
Spirulina (Arthrospira) : potential application as an animal feed supplement. Ed. Dainippon Ink & Chemicals, Tokyo Japan 1996.
Journal of applied Phycology 1996 ; 8 : 303-11.
147. Henrikson R.
Earth Food Spirulina [en ligne].
Laguna Beach, Californie : Ronore Enterprises, Inc.
ISBN 0-9623111-0-3, 180 pages.
c2000. [consulté le 12/02/2007]. Disponible sur :
<http://www.spirulinasource.com/earthfoodch5c.html>
148. Henrikson R.
Healthy food for cats and dogs [en ligne].
Laguna Beach, Californie : Ronore Enterprises, Inc.
ISBN 0-9623111-0-3, 180 pages.
c2000. [consulté le 12/02/2007]. Disponible sur :
<http://www.spirulinasource.com/earthfoodch5c.html>
149. La Wicca.
Quand conseiller la spiruline aux animaux ? [en ligne].
c2007. [consulté le : 16/01/2007]. Disponible sur :
<http://www.la-wicca.com/ecologis/animaux/spiruline.php>

150. La Wicca.
Quel dosage pour les animaux ? [en ligne].
c2007. [consulté le : 16/01/2007]. Disponible sur :
<http://www.la-wicca.com/ecologis/animaux/spiruline.php>
151. Henrikson R.
Tonic for horses, cows and breeding bulls [en ligne].
Laguna Beach, Californie : Ronore Enterprises, Inc.
ISBN 0-9623111-0-3, 180 pages.
c2000. [consulté le 12/02/2007]. Disponible sur :
<http://www.spirulinasource.com/earthfoodch5c.html>
152. Kpodékon M, Rideaud P, Coudert P.
Pasteurellose du lapin : revue [en ligne].
c2003 INRA mise à jour : 30/01/04. [consulté le : 16/01/2007]. Disponible sur :
<http://wcentre.tours.inra.fr/urbase/internet/resultats/articles/pasteurellose.htm>
153. Henrikson R.
Spirulina - Benefits for pets and animals [en ligne].
Laguna Beach, Californie : Ronore Enterprises, Inc.
ISBN 0-9623111-0-3, 180 pages.
c2000. [consulté le 12/02/2007]. Disponible sur :
<http://www.spirulinasource.com/earthfoodch5c.html>
154. Henrikson R.
Health, beauty and color for ornamental birds [en ligne].
Laguna Beach, Californie : Ronore Enterprises, Inc.
ISBN 0-9623111-0-3, 180 pages.
c2000. [consulté le 12/02/2007]. Disponible sur :
<http://www.spirulinasource.com/earthfoodch5c.html>
155. Buanomano G.
L'alimentation des oiseaux.
Au Paradis des Canaris [en ligne].
c2000 – 2007. [consulté le : 16/01/2007]. Disponible sur :
<http://www.apdcanari.com/index.php/?2007/11/01/266-l-alimentation-des-oiseaux>
156. Henrikson R.
Spirulina - Summary of benefits for aquaculture [en ligne].
Laguna Beach, Californie : Ronore Enterprises, Inc.
ISBN 0-9623111-0-3, 180 pages.
c2000. [consulté le 12/02/2007]. Disponible sur :
<http://www.spirulinasource.com/earthfoodch5c.html>
157. Zooplus AG.
Nourritures pour poissons [en ligne].
c1999-2008. [consulté le : 16/01/2007]. Disponible sur :
http://www.zooplus.fr/shop/poissons/nourriture_poissons/nourriture_poissons_aquarium/sera_poisson_fond/15927

158. Aquariofil.com.
Nourritures "spécial éleveurs" [en ligne].
c2000-2008. [consulté le : 16/01/2007]. Disponible sur :
http://www.aquariofil.com/fr/cat/nourriture_poisson_aquarium/nourriture_bassins/index.html
159. Guillet P.
L'histoire des carpes Koi [en ligne].
c2002 – 2008. [consulté le : 19/01/2007]. Disponible sur :
<http://www.passionbassin.com/histoire-carpe-koi.php>
160. Guillet P.
La biologie et le comportement des carpes koi [en ligne].
c2002 – 2008. [consulté le : 19/01/2007]. Disponible sur :
<http://www.passionbassin.com/biologie-carpe-koi.php>
161. Guillet P.
L'alimentation des carpes Koi dans la nature [en ligne].
c2002 – 2008. [consulté le : 19/01/2007]. Disponible sur :
<http://www.passionbassin.com/koi-alimentation.php>
162. Guillet P.
L'alimentation des carpes Koi en élevage [en ligne].
c2002 – 2008. [consulté le : 19/01/2007]. Disponible sur :
<http://www.passionbassin.com/nourriture-koi.php>
163. Koi Tropic
Nourriture flottante pour carpes Koi [en ligne].
c2007. [consulté le : 19/01/2007]. Disponible sur :
<http://www.koitropic.com/media/nourriture.pdf>
164. Garrier – jonathan.
Nourritures pour poissons [en ligne].
c02/ 2006 [consulté le : 19/01/2007]. Disponible sur :
<http://bassins-de-jardins.wifeo.com/nourritures-poissons.php>
165. Velda.
Progressive Koi food 3 mm [en ligne].
c2007. [consulté le : 19/01/2007]. Disponible sur :
<http://www.velda.com/L04p4010.php?lng=L04&id=100522>
166. Guillet P.
Galerie photos de différentes variétés de carpes Koi [en ligne].
c2002 – 2008. [consulté le : 19/01/2007]. Disponible sur :
http://www.koipassion.com/cms/index.php?option=com_datso-gallery&Itemid=22&func=viewcategory&catid=20

167. Henrikson R.
Natural colors for foods and cosmetics [en ligne].
Laguna Beach, Californie : Ronore Enterprises, Inc.
ISBN 0-9623111-0-3, 180 pages.
c2000. [consulté le 12/02/2007]. Disponible sur :
<http://www.spirulinasource.com/earthfoodch5c.html>
168. Algosopnette
La peau, les cheveux et les ongles avec la spiruline [en ligne].
c2007. [consulté le : 11/03/2007]. Disponible sur :
<http://www.algosopnette.com/association/spiruline-redactionnel-30.html>
169. Jade Recherche.
La phycocyanine [en ligne].
c2007. [consulté le : 12/03/2007]. Disponible sur :
<http://www.jaderecherche.com/phycocyanine.htm>
170. Henrikson R.
Fluorescent markers for medical tests. [en ligne].
Laguna Beach, Californie : Ronore Enterprises, Inc.
ISBN 0-9623111-0-3, 180 pages.
c2000. [consulté le 12/02/2007]. Disponible sur :
<http://www.spirulinasource.com/earthfoodch5c.html>
171. Henrikson R.
Enzymes for genetic research.
New super spirulina products and extracts [en ligne].
Laguna Beach, Californie : Ronore Enterprises, Inc.
ISBN 0-9623111-0-3, 180 pages.
c2000. [consulté le 12/02/2007]. Disponible sur :
<http://www.spirulinasource.com/earthfoodch5c.html>
172. Qishen P.
Enhancement of endonuclease activity and repair DNA synthesis by polysaccharide of spirulina.
Chinese Genetics Journal 1988 ; 15 (5) : 374-381.
173. CCIP : Environnement.
Les gaz à effet de serre : Evolution [en ligne]
c2006. [consulté le : 23/02/2007]. Disponible sur :
<http://www.environnement.ccip.fr/air/ges/evolution-gaz-effet-de-serre.htm>
174. CCIP : Environnement.
Les gaz à effet de serre : Conséquences [en ligne].
c2006. [consulté le : 23/02/2007]. Disponible sur :
<http://www.environnement.ccip.fr/air/ges/consequences-effet-de-serre.htm>

175. CCIP : Environnement.
Les gaz à effet de serre : Mesures internationales [en ligne].
c2006. [consulté le : 23/02/2007]. Disponible sur :
<http://www.environnement.ccip.fr/air/ges/mesures-internationales.htm>
176. Jancovici J.M.
Existe-t-il des énergies sans CO₂ ?[en ligne].
c31/10/2000. Fondation Nicolas Hulot pour la Nature et l'Homme. [consulté le :
23/10/2007]. Disponible sur :
www.fnh.org/francais/faq/effet_serre/sans_co2.htm
177. Jancovici J.M.
Les puits de carbone ne vont ils pas absorber le surplus de CO₂ ?[en ligne].
c14/02/2001. Fondation Nicolas Hulot pour la Nature et l'Homme. [consulté le :
23/10/2007]. Disponible sur :
www.fnh.org/francais/faq/effet_serre/puits.htm
178. Henrikson R.
Resource advantages and world food politics. [en ligne].
c2000. [consulté le 12/02/2007]. Disponible sur :
<http://www.spirulinasource.com/earthfoodch7a.html>
179. Costa J.
Utilisation de la spiruline pour épurer des eaux usées au Brésil [en ligne].
Colloque du 3-6 mai 2004 ; Ile des Embiez, Var, France.
Institut Océanographique Paul Ricard ; 2005. 192 pp.
c2005. [consulté le : 7/01/2007]. Disponible sur :
<http://www.com.univ-mrs.fr/IRD/urcyano/activites/pdf/cyano&sante2.pdf>
180. Haldemann F.
Système d'épuration de Aldanempres à Quito (Equateur) [en ligne].
Compte-rendu du « Mini-colloque » de Mialet sur la production de la spiruline
artisanale [en ligne].
Mialet (France) ; 26-28 /06/2002. p.1-7
<http://www.com.univ-mrs.fr/IRD/urcyano/activites/pdf/spirulin.pdf>
181. Michka.
La spiruline, une algue pour l'Homme et la Planète.
Genève : Georg Editeur ; 1992.
182. Site officiel de l'Année internationale de l'eau douce 2003
L'eau douce : faits et chiffres
c28/01/2004. [consulté le : 8/02/2007]. Disponible sur :
http://www.wateryear2003.org/fr/ev.php-URL_ID=1462&URL_DO=DO_TOPIC&URL_SECTION=201.html
183. Institut pour la Recherche et le Développement (IRD)
Culture en eau de mer [en ligne].
c6/10/2003. [consulté le : 8/02/2007]. Disponible sur :
<http://www.com.univ-mrs.fr/IRD/urcyano/activites/embiez.htm>

184. ESA.
La culture de *Spirulina* en photobioréacteur [en ligne].
[consulté le : 23/06/2007]. Disponible sur :
<http://ecls.esa.int/ecls/attachments/MELiSSA-Phase5/education/photobioreacteur.pdf>
185. High Tech Info.
Projet Melissa : Des bactéries vont voyager dans l'espace [en ligne].
c2005/2007. [consulté le : 21/06/2007]. Disponible sur :
<http://www.high-tech-info.net/modules.php?name=Forums&file=viewtopic&p=7714>
186. Manoj G, Venkataraman LV, Srinivas L.
Antioxidant properties of *Spirulina* (*Spirulina platensis*).
In : Seshadri and Bai. *Spirulina*. MCRC. 1992 : 48-154
187. Zhi-gang Z, Zhi-li L, Xue-xian L.
Study on the isolation, purification and antioxidation properties of polysaccharides from *Spirulina maxima*.
Acta Botanica Sinica. 1997; 39 : 77-81.
188. Miranda MS, Cintra RG, Barros SM, Mancini-Filho J.
Antioxidant activity of the microalga *Spirulina maxima*.
Braz J Med Biol Res. 1998 ; 31 : 1075-79.
189. Belay A.
The potential application of spirulina (*Arthrospira*) as a nutritional and therapeutic supplement in health management.
Mark Houston, MD (editor-in-chief).
JANA Vol.5, N°2, spring 2002 : 27-45.
190. Jade Recherche.
Article scientifique : La Phycocyanine [en ligne].
c2007. [consulté le : 17/07/2007]. Disponible sur :
http://www.jaderecherche.com/decouvrez_la_phycocyanine.pdf
191. Romay C, Gonzalez R.
Phycocyanin is an antioxidant protector of human erythrocytes against lysis by peroxy radicals.
J Pharm Pharmacol. 2000 ; 52 : 367-68.
192. Hirata T, Tanaki M, Ooike M, Tsunomura T, Sagakuchi M.
Antioxidant activities of phycocyanobillin prepared from *Spirulina platensis*.
J Appl Phycol. 2000 : 435-39.
193. Bhat VB, Madyastha KM.
Scavenging of peroxynitrite by phycocyanin and phycocyanobilin from *spirulina platensis* : protection against oxidative damage to DNA.
Biochem Biophys Res Commun. 2001 ; 285(2) : 262-66.

194. Goldsby RA, Kindt TJ, Osborne BA.
Immunologie : le cours de Janis Kuby.
Paris : Dunod ; 2003.
195. Qureshi MA, Ali RA.
Spirulina platensis exposure enhances macrophage phagocytic function in cats.
Immunopharmacol Immunotoxicol.1996 ; 18 : 457-63.
196. Qureshi MA, Kidd MT, Ali RA.
Spirulina platensis extract enhances chicken macrophage functions after *in vitro* exposure.
J Nutr Immunol. 1995 ; 3 : 35-44.
197. Qureshi MA, Garlich J, Kidd M.
Dietary *Spirulina platensis* enhances humoral and cell-mediated immune function in chickens.
Immunopharmacol Immunotoxicol.1996 ; 18 : 465-76.
198. Qureshi MA, Ali RA, Hunter RL.
Immunomodulatory effects of *Spirulina platensis* supplementation in chickens.
In : Proceedings of the 44th Western Poultry Disease Conference 1995 .p.117-21.
199. Yang H, Lee E, Kim H.
Spirulina platensis inhibits anaphylactic reaction.
Life Sciences. 1997 ; 61 : 1237-44.
200. Kim H, Lee E, Cho H, Moon Y.
Inhibitory effect of mast cellmediated immediate-type allergic reactions in rats by *Spirulina*.
Biochem Phamacol. 1998 ; 55 : 1071-76.
201. Allain P.
Histamine [en ligne].
c2002-2008. [consulté le : 17/10/2007]. Disponible sur :
<http://www.pharmacorama.com/Rubriques/Output/Histamine2.php>
202. Hayashi O, Katoh T, Okuwaki Y.
Enhancement of antibody production in mice by dietary *spirulina platensis*.
J Nutr Sci Vitaminol (Tokyo). 1994 Oct ; 40 (5) : 431-41.
203. Liu L, Guo B, Ruan J, Dai X, Chen L, Wu B.
Study on effect and mechanism of polysaccharides on *Spirulina platensis* on body immune functions improvement.
Marine Sci. 1991 ; 6 : 44-49.
204. Hayashi O, Hirahashi T, Katoh T, Miyajima H, Hirano T, Okuwaki Y.
Class specific influence of dietary *Spirulina platensis* on antibody production in mice.
J Nutr Sci Vitaminol. 1998 ; 44 : 841-51.

205. Ishii K, Katoh T, Okuwaki Y, Hayashi O.
Influence of dietary *Spirulina platensis* on IgA level in human saliva.
J Kagawa Nutr Univ. 1999 ; 30 : 27-33.
206. Gershwin ME, Mao TK, Van de Water J.
Effects of a spirulina-based dietary supplement on cytokine production from allergic rhinitis patients.
J Med Food. 2005 ; 8(1) : 27-30.
207. Hernandez-Corona A., Nieves I., Meckes M., Chamorro G., Barron BL.
Antiviral activity of *spirulina maxima* against herpes simplex virus type 2.
Antiviral Res. 2002 ; 56 (3) : 279-85.
208. Ayehunie S, Belay A, Baba TW, Ruprecht RM.
Inhibition of HIV-1 replication by an aqueous extract of *Spirulina platensis* (*Arthrospira platensis*).
J Acquired Immune Deficiency Syndromes and Human Retrovirology. 1998 ; 18 : 7-12.
209. Hayashi T, Hayashi K, Maedaa M, Kojima I.
Calcium spirulan, an inhibitor of enveloped virus replication, from a blue green alga *Spirulina platensis*.
J Nat Prod. 1996 ; 59 : 83-87.
210. Hayashi K, Hayashi T, Kojima I.
A natural sulfated polysaccharide, calcium spirulan, isolated from *Spirulina platensis* : *in vitro* and *ex vivo* evaluation of anti-Herpes simplex virus and anti-human immunodeficiency virus activities.
AIDS Research and Human Retroviruses. 1996 ; 12 : 1463-71.
211. Lee JB, Srisomporn P, Hayashi K, Tanaka T, Sankawa U, Hayashi T.
Effects of structural modification of calcium spirulan, a sulfated polysaccharide from *Spirulina platensis*, on antiviral activity.
Chem Pharm Bull (Tokyo). 2001 Jan ; 49(1) : 108-10.
212. Hayashi K, Hayashi T, Kojima I.
A natural sulfated polysaccharide, calcium spirulan, isolated from *Spirulina platensis* : *in vitro* and *ex vivo* evaluation of anti-herpes simplex and anti-human immunodeficiency virus activities.
Aids Research and Human Retrovirus [en ligne].
c1996. [consulté le : 12/10/2007] ; 15 (12), 1463-71. Disponible sur :
<http://www.cbb-developpement.com/00/.%5C7%5C747.htm>

213. Tarnagda Z., Zeba A., Siribie A., Yougbare I., Mare D., Nikiema J.B. et al.
Etude de l'impact de la spiruline sur l'état général et physique des personnes vivant avec le VIH au Burkina Faso (Résultats préliminaires) [en ligne].
4^{ème} conférence sur le VIH/SIDA, Cité des Sciences et de l'Industrie de Paris ; 2007
29-31 mars ; Paris, France.
[consulté le : 11/06/2007]. Disponible sur :
www.vihparis2007.com
214. Faculté de médecine de Limoges.
Cours de nutrition à la faculté de médecine de Limoges : Nutrition et SIDA [en ligne].
c2007. [consulté le : 12/10/2007]. Disponible sur :
http://www.chu-limoges.fr/nutrition/cours/nutrition_sida/biblio.htm
215. Faculté de médecine de Limoges.
Cours de nutrition à la faculté de médecine de Limoges : Mécanismes de la dénutrition lors du SIDA [en ligne].
c2007. [consulté le : 12/10/2007]. Disponible sur :
http://www.chu-limoges.fr/nutrition/cours/nutrition_sida/biblio.htm
216. Faculté de médecine de Limoges.
Cours de nutrition à la faculté de médecine de Limoges
Prise en charge nutritionnelle [en ligne].
c2007. [consulté le : 18/10/2007]. Disponible sur :
http://www.chu-limoges.fr/nutrition/cours/nutrition_sida/biblio.htm
217. FAO-OMS
Vivre au mieux avec le VIH/SIDA : Un manuel sur les soins et le soutien nutritionnels à l'usage des personnes vivant avec le VIH/SIDA [en ligne].
c2003. [consulté le : 18/10/2007]. Disponible sur :
<ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/006/y4168f/y4168f00.pdf>
218. Mathew B, Sankaranarayanan R, Nair PP, Varghese C, Somanathan T, Amma BP. et al.
Evaluation of chemoprevention of oral cancer with *Spirulina fusiformis*.
Nutr Cancer. 1995 ; 24(2) : 197-202.
219. Liu Y, Xu L, Cheng N, Lin L, Zhang C.
Inhibitory effect of phycocyanin from *Spirulina platensis* on the growth of human leukemia K562 cells.
J Appl Phycol. 2000 ; 12 :125-30.
220. Centre François Baclesse à Caen.
L'apoptose [en ligne].
c1997-2008. [consulté le : 29/11/2007]. Disponible sur :
<http://www.baclesse.fr/cours/fondamentale/4-division-cellulaire/Divis-i-17.htm>

221. Qishen P, Baojiang G, Rhong R.
Enhancement of endonuclease activity and repair of DNA synthesis by polysaccharide of *Spirulina platensis*.
Chinese Genetics Journal (Acta Genetica Sinica) 1988 ; 15 : 33374-81.
222. Mishima T, Murata J, Toyoshima M, Fujii K, Nakajima M, Hayashi T. et al.
Inhibition of tumor invasion and metastasis by calcium spirulan (Ca-SP), a novel sulfated polysaccharide derived from a blue-green alga, *Spirulina platensis*.
Clin Exp Metastasis.1998 ; 16 : 541-550.
223. Centre François Baclesse à Caen.
Invasion locale[en ligne].
c1997-2008. [consulté le : 29/11/2007]. Disponible sur :
<http://www.baclesse.fr/cours/fondamentale/c11-invasion/Invasion-0.htm>
224. Schwartz J, Shklar G.,
Regression of experimental hamster cancer by beta carotene and algae extracts.
J Oral Maxillofac Surg. 1987 ; 45 : 510-15.
225. Schwartz J, Shklar G, Reid S, Trickler D.
Prevention of experimental oral cancer by extracts of *Spirulina-Dunaliella* algae.
Nutr Cancer. 1988 ; 11 : 127-34.
226. Schwartz J, Troxler RF, Saffer BG.
Algae-derived phycocyanin is both cytostatic and cytotoxic to oral squamous cell carcinoma (human or hamster).
J Dent Res. 1987 ; 66 : 160.
227. Girardin-Andréani C.
Spiruline : Système sanguin, système immunitaire et cancer. [en ligne].
Communication faite aux journées de l'AMPP ; 28-29 juin, Paris.
[consulté le 28/12/2007]. Disponible sur :
<http://www.goji-himalaya.com/Onglet%205/ONGLET%205%20SPIRULINE%202003.pdf>
228. Ramirez D, Fernández V, Tapia G, González R, Videla LA.
Influence of C-phycocyanin on hepatocellular parameters related to liver oxidative stress and Kupffer cell functioning.
Inflamm Res 2002 Jul ; 51(7) : 351-56.
229. Vadiraja B, Gaikwad N, Madyastha K.
Hepatoprotective effect of C-phycocyanin: protection for carbon tetrachloride and R-(+)-pulegone-mediated hepatotoxicity in rats.
Biochem Biophys Res Commun. 1998 : 428-31.
230. Fukino H, Takagi Y, Yamane Y.
Effect of *Spirulina platensis* on the renal toxicity induced by inorganic mercury and cisplatin.
Eisei Kagaku. 1990 ; 36 : 5.

231. Yamane Y, Fukino H, Icho T, Kato T, Shimamatsu H.
Effect of *Spirulina platensis* on the renal toxicity induced by inorganic mercury and para-aminophénol.
In : Summary of Abstracts. 108th Conference of the Pharmaceutical Society of Japan. 1998 .p. 58.
232. Khan M, Shobha JC, Mohan IK, Naidu MU, Sundaram C, Singh S, Kuppusamy P, Kutala VK.
Protective effect of Spirulina against doxorubicin-induced cardiotoxicity.
Phytother Res 2005 Dec ; 19 (12) : 1030-37.
233. Thaakur SR, Jyothi B.
Effect of spirulina maxima on the haloperidol induced tardive dyskinesia and oxidative stress in rats.
J Neural Transm. 2007 Sep ; 114(9) :1217-25.
234. Rimbau V, Camins A, Romay C, González R, Pallàs M.
Protective effects of C-phycoyanin against kainic acid-induced neuronal damage in rat hippocampus.
Neurosci Lett. 1999 Dec 3 ; 276 (2) : 75-78.
235. Misbahuddin M, Islam AZ, Khandker S, Ifthaker M, Islam N, Anjumanara.
Efficacy of spirulina extract plus zinc in patients of chronic arsenic poisoning : a randomized placebo-controlled study.
Clin Toxicol (Phila). 2006 ; 44(2):135-41.
236. Romay C, Armesto J, Remirez D, Gonzalez R, Ledon L, Garcia I.
Antioxidant and anti-inflammatory properties of c-phycoyanin from blue-green algae.
Inflamm Res.1998 ; 47 : 36-41.
237. Romay C, Ledón N, Gonzalez R.
Further studies on anti-inflammatory activity of phycocyanin in some animal models of inflammation.
Inflamm Res. 1998 Aug ; 47(8) : 334-8.
238. Romay C, Ledón N, González R.
Effects of phycocyanin extract on prostaglandin E2 levels in mouse ear inflammation test.
Arzneimittelforschung. 2000 Dec ; 50 (12) : 1106-09.
239. Reddy CM, Bhat VB, Kiranmai G, Reddy MN, Reddanna P, Madyastha KM.
Selective inhibition of cyclooxygenase-2 by C-phycoyanin, a biliprotein from *Spirulina platensis*.
Biochem Biophys Res Commun. 2000 Nov ; 277 (3) : 599-603.
240. Loseva L.P. et Dardynskaya I.V.
Protector effect of Spirulina against radiations.
In : Spirulina natural sorbent of radionucleid.
Recheareh Institute of Radiation Medicine, 1991 Minsk, Belarus.

241. Fernex M.
Veut-on nier le rôle pathogène du césium 137 incorporé dans l'organisme des enfants ?
In : Le Dniepr N°31 : Journal des enfants de Tchernobyl, septembre 2004.
242. Qishen P, Baojiang G, Kolman A.
Radioprotective effect of extract from *Spirulina platensis* in mouse bone marrow cells studied by using the micronucleus test.
Toxicol Letters.1989 ; 48 : 165-169.
243. El Hadri A, Abrini J, Idaomar M.
Micronoyaux comme biomarqueur du développement des tumeurs [en ligne].
c2007. [consulté le : 15/12/2007]. Disponible sur :
http://www.telecom.uae.ma/embs/EBM_Proceedings/Chap_6_EBM.pdf
244. Schwartz J., Troxler RF, Saffer BG.
Algae-derived phycocyanin is both cytostatic and cytotoxic to oral squamous cell carcinoma (human or hamster).
J Dent Res. 1987 ; 66 : 160.
245. Karpov LM, Poltavtseva NV, Ershova ON, Karakis SG, Vasil'eva TV, Chaban IuL.
The postradiation use of vitamin-containing complexes and a phycocyanin extract in a radiation lesion in rats.
Radiats Biol Radioecol. 2000 May-Jun ; 40 (3) : 310-14.
246. Cheng-Wu Z., Chao-tsi T., Yuan-zhen Z.
The effects of polysaccharide and phycocyanin from *Spirulina platensis* on peripheral blood and hematopoietic system of bone marrow in mice.
Book of Abstracts. Second Asia Pacific Conference on Algal Biotechnology. 1994 ; 58.
247. De Rivera C, Miranda-Zamora R, Diaz-Zagoya JC, Juarez-Oropeza M.
Preventive effect of *Spirulina maxima* on the fatty liver induced by a fructose-rich diet in the rat.
Life Sciences.1993 ; 53 : 57-61.
248. Nakaya N, Homa Y, Goto Y.
Cholesterol lowering effect of *Spirulina*.
Nutr Rep Int. 1988 ; 37 : 1329-1337.
249. Parikh P, Mani U, Iyer U.
Role of *Spirulina* in the Control of Glycemia and Lipidemia in Type 2 Diabetes Mellitus.
J Med Food. 2001 Winter ; 4 (4) : 193-99.
250. Ionov VA, Basova MM.
Use of blue-green micro-seaweed *Spirulina platensis* for the correction of lipid and hemostatic disturbances in patients with ischemic heart disease. [Article in Russian]
Vopr Pitan. 2003 ; 72 (6) : 28-31.

251. Samuels R, Mani UV, Iyer UM, Nayak US.
Hypocholesterolemic effect of spirulina in patients with hyperlipidemic nephrotic syndrome.
J Med Food. 2002 Summer ; 5 (2) : 91-96.
252. Girardin-Andréani C.
La spiruline : cours/conférence 2007 duménat phyto-aromathérapie [en ligne].
Faculté de médecine Paris XIII, Bobigny [consulté le : 24/09/2007]. Disponible sur :
<http://www.goji-himalaya.com/Onglet%205/ONGLET%205%20SPIRULINE%202007.pdf>
253. Tsuchihashi N, Watanabe T, Takai Y.
Effect of Spirulina platensis on caecum content in rats.
Bull Chiba Hygiene College. 1987 ; 5 : 27-30.
254. Meda N, Chevalier P, Mathieu-Daude C.
Manifestations oculaires liées à la carence en vitamine A en zone rurale du Burkina Faso.
Med.Trop. 2000 ; 60 : 57-60.
255. Seshadri CV.
Large scale nutritional supplementation with spirulina alga.
Shri Amm Murugappa Chettiar Research Center (MCRC) : Madras, India ; 1993.
256. Commission européenne : Programmes de coopération extérieure.
Programme thématique pour la sécurité alimentaire (2007-2010) [en ligne].
c29/01/2008. [consulté le : 20/12/2007]. Disponible sur :
http://ec.europa.eu/europeaid/where/worldwide/food-security/working-documents_fr.htm
257. UNICEF : Situation des enfants dans le monde 1998.
Qu'est-ce que la malnutrition ? [en ligne].
c1998. [consulté le : 20/12/2007]. Disponible sur :
<http://www.unicef.org/french/sowc98/e014.htm>
258. Dillon JC.
Nutrition et Malnutrition chez l'enfant [en ligne].
c06/2000. [consulté le : 17/12/2007]. Disponible sur :
<http://www.antenna.ch/malnutrition/nutrition-infantile.html>
259. Technap/Credeasa.
Différentes formes de malnutrition [en ligne].
c2003. [consulté le : 17/12/2007]. Disponible sur :
<http://spirulina.online.fr/cd-cfppa/LivUtil-fich3.htm>

260. Skoet J, Stamoulis K.
L'état de l'insécurité alimentaire dans le monde en 2006 [en ligne].
Rome, Italie : Viale delle Terme di Caracalla : Organisation des Nations Unies pour
l'alimentation et l'agriculture ; 2006 [consulté le :18/12/2007]. Disponible sur :
<http://www.fao.org/docrep/009/a0750f/a0750f00.htm>
261. PopulationData.net.
Carte de la malnutrition dans le monde [en ligne].
c2008. [consulté le 18/12/2007]. Disponible sur :
<http://www.populationdata.net/cartes/actus/faim-monde-2005.htm>
262. UNICEF : Situation des enfants dans le monde 1998.
Reconnaître le droit à la nutrition [en ligne].
c1998. [consulté le : 20/12/2007]. Disponible sur :
<http://www.unicef.org/french/sowc98/e020.htm>
263. Technap/Credeva.
Les causes de la malnutrition [en ligne].
c2003. [consulté le : 17/12/2007]. Disponible sur :
<http://spirulina.online.fr/cd-cfppa/LivUtil-fich3.htm>
264. UNICEF.
La malnutrition : causes, conséquences et solutions [en ligne].
c1998. [consulté le : 20/12/2007]. Disponible sur :
<http://www.unicef.org/french/sowc98/pdf/presume.pdf>
265. Antenna Technologies (Denis von der Weid).
Malnutrition : un massacre silencieux [en ligne].
c09/2000. [consulté le : 1/12/2007]. Disponible sur :
<http://vertleburkina.unblog.fr/files/2008/02/malnutritionunmassacresilencieux.pdf>
266. TECHNAP/CREDESA.
Malnutrition protéino-énergétique [en ligne].
c13/08/2003. [consulté le : 1/12/2007]. Disponible sur :
<http://spirulina.online.fr/cd-cfppa/LivUtil-fich6.htm>
267. UNICEF.
Malnutrition et mortalité des enfants [en ligne].
c1998. [consulté le : 20/12/2007]. Disponible sur :
<http://www.unicef.org/french/sowc98/>
268. UNICEF.
Les effets désastreux de la malnutrition.
c1998. [consulté le : 20/12/2007]. Disponible sur :
<http://www.unicef.org/french/sowc98/>
269. OMS : Le rapport sur la santé dans le monde en 2006.
Travailler ensemble pour la santé [en ligne].
c2008. [consulté le : 21/12/2007]. Disponible sur :
<http://www.who.int/whr/2006/chapter1/fr/index.html>

270. UNICEF.
Croissance et développement intellectuel[en ligne].
c1998. [consulté le : 20/12/2007]. Disponible sur :
<http://www.unicef.org/french/sowc98/e016.htm>
271. Simpore J, Kabore F, Zongo F, Dansou D, Bere A, Pignatelli S et al.
Nutrition rehabilitation of undernourished children utilizing Spiruline and Misola.
Nutrition Journal 2006 ; 5 : 3.
272. UNICEF.
Burkina Faso : statistiques [en ligne].
[consulté le : 20/12/2007]. Disponible sur :
http://www.unicef.org/french/infobycountry/burkinafaso_statistics.html
273. Branger B, Cadudal JL, Delobel M, Ouoba H, Yameogo P, Ouedraogo D, et al.
La spiruline comme complément alimentaire dans la malnutrition du nourrisson au Burkina Faso.
Arch Pédiatr 2003 ; 10 : 424-31.
274. Sall MG, Dankoko B, Badiane M, Ehua E, Kuakuwi N.
Résultats d'un essai de réhabilitation nutritionnelle avec la spiruline à Dakar (à propos de 59 cas).
Méd Afrique Noire 1999 ; 46 : 143-46.
275. Simpore J, Kabore F, Zongo F, Dansou D, Ouattara Y, Bere A, et al.
Nutrition rehabilitation of the HIV-infected and negative undernourished children utilizing spiruline.
Pakistan Journal of Biological Sciences 2005 ; 8 (4) : 589-95.
276. Habou O.
Evaluation de l'efficacité de la supplémentation en spiruline du régime habituel des enfants atteints de malnutrition sévère (à propos de 56 cas) [dissertation].
Niamey : Université Abdou Moumouni ; 2003.
277. UNICEF.
Niger : statistiques [en ligne].
[consulté le : 20/12/2007]. Disponible sur :
http://www.unicef.org/french/infobycountry/niger_statistics.html
278. UNICEF.
Sénégal : statistiques [en ligne].
[consulté le : 20/12/2007]. Disponible sur :
http://www.unicef.org/french/infobycountry/senegal_statistics.html
279. OMS - FAO – ORSTOM.
Situation Nutritionnelle en Afrique.
In : Réunion Préparatoire à la Conférence Internationale sur la Nutrition.
Dakar 24 - 28 Février 1992 .p. 1 - 31.

280. Picard E.
Le traitement de la MPE avec la spiruline en Centrafrique.
Centre de Nutrition du Foyer de Charité de Bangui ; 1993 . p. 1 – 3.
281. Sall MG, Kuakuwin N, Sow HD, Sanokho A, Senghor G.
Etude comparative de trois méthodes thérapeutiques de la MPC de l'enfant en milieu hospitalier : à propos de 402 cas.
In : Les Carences Nutritionnelles dans les PVD.
Paris : ed Karthala ; ACCT 1989. p. 598 - 602.
282. Sall MG, Kuakuwin N, Mbaye NG, Fall M.
Essai d'un aliment de sevrage commercial dans le traitement des MPE graves en milieu hospitalier (à propos de 76 cas).
Le Pharmacien d'Afrique 1993 ; 76 : 7 - 11.
283. Waterlow JC.
Protein Energy Malnutrition.
Eds. Edward, Arnold, London
Melbourne Auckland 1992.
284. Guiro A.T, Sall MG, Kane O, Ndiaye AM, Diarra D. et MTA.
Effects of rehabilitation with a pearl millet weaning food.
Nutrition Reports International 1987 ; 26 (57) : 595 – 600.
285. Thinakarvel M, Edwin N, Von der Weid D.
Spirulina, a nutrition booster.
7th World Congress on Clinical Nutrition, New Dehli, India, 1999 [en ligne].
[consulté le 15/09/2007]. Disponible sur :
<http://spirulina.netfirms.com/study.htm>
286. UNICEF.
Inde : statistiques [en ligne].
[consulté le : 20/12/2007]. Disponible sur :
http://www.unicef.org/french/infobycountry/india_statistics.html
287. Bucaille P.
Intérêt et efficacité de l'algue spiruline dans l'alimentation des enfants présentant une malnutrition protéino-énergétique en un milieu tropical.
Th doctorat : Université Paul Sabatier Toulouse III, 10/10/1990.
288. Sironval C.
La spiruline, une arme contre la malnutrition, histoire et perspectives.
Bulletin de l'Institut Océanographique de Monaco n° spécial 12.
Monaco, Musée océanographique ; 1993 .p. 203-10.

289. Ancel P.
Spiruline humanitaire dans les pays en voie de développement : penser au lendemain [en ligne].
c05/2004. [consulté le : 12/11/2007]. Disponible sur :
<http://www.antenna.ch/documents/manuelJourdan2061.pdf>
290. CFPPA Hyères – Technap – Ancel P.
Rater son projet spiruline en pays en voie de développement [en ligne].
c04/2006. [consulté le : 14/12/2007]. Disponible sur :
<http://www.spirulineburkina.org/datas/Rater%20son%20projet%20spiruline.ppt>
291. Chavagneux C.
FMI : des conditions à revoir.
Alternatives économiques février 2008 ; n°266.
292. Manière de voir.
Les dossiers de la mondialisation.
Le Monde diplomatique janvier-février 2007 ; n° 91.
293. CFPPA Hyères – Technap – Ancel P.
Partenaires et étapes d'un projet spiruline en pays en voie de développement.
c04/2006. [consulté le : 14/12/2007]. Disponible sur :
<http://www.technap-spiruline.org/datas/Partenaires%20et%20%E9tapes%20d'un%20projet%20spiruline.ppt>
294. Planchon G.
La spiruline pour tous : culture familiale.
Tourbes : Les idées bleues ; 2006.
295. Antenna Technologies France.
Notre histoire [en ligne].
[consulté le : 17/11/2007]. Disponible sur :
<http://www.antenna-france.org/4498/43980.html>
296. Antenna Technologies France.
Notre philosophie [en ligne].
[consulté le : 17/11/2007]. Disponible sur :
<http://www.antenna-france.org/4498/45422.html>
297. Antenna Technologies France.
Notre expertise [en ligne].
[consulté le : 17/11/2007]. Disponible sur :
<http://www.antenna-france.org/4498/43953.html>
298. Antenna Technologies France.
L'équipe des membres actifs [en ligne].
[consulté le : 17/11/2007]. Disponible sur :
<http://www.antenna-france.org/4498/44034.html>

299. TECHNAP Spiruline.
Présentation de l'association Technap [en ligne].
[consulté le : 19/10/2007]. Disponible sur :
<http://www.technap-spiruline.org/>
300. CODEGAZ.
Présentation [en ligne].
c2005. [consulté le : 23/10/2007]. Disponible sur :
<http://www.codegaz.org/>
301. CODEGAZ.
Nos actions [en ligne].
c2005. [consulté le : 23/10/2007]. Disponible sur :
<http://www.codegaz.org/>
302. CODEGAZ.
Les premiers pas de CODEGAZ sur le chemin de la Spiruline [en ligne].
c2005. [consulté le : 23/10/2007]. Disponible sur :
<http://www.codegaz.org/>
303. Targinca.
Historique et objet [en ligne].
c2006. [consulté le : 23/10/2007]. Disponible sur :
<http://www.targinca.org/histo.htm>
304. Targinca.
Domaines d'intervention [en ligne].
c2006 [consulté le : 23/10/2007]. Disponible sur :
<http://www.targinca.org/domaines.htm>
305. Targinca.
Ethique et philosophie [en ligne].
c2006. [consulté le : 23/10/2007]. Disponible sur :
<http://www.targinca.org/ethique.htm>
306. TECHNAP/CREDESA.
Préface du Livret-guide de production [en ligne].
c2001. [consulté le : 14/12/2007]. Disponible sur :
<http://credesa.online.fr/preface.htm>
307. OCADES.
Spiruline du Burkina Faso [en ligne].
[consulté le : 7/12/2007]. Disponible sur :
http://www.spirulineburkina.org/component/option,com_frontpage/Itemid,48/lang,fr

308. Sorto M.
Utilisation et consommation de la spiruline au Tchad [en ligne].
2ème Atelier international : Voies alimentaires d'amélioration des situations
nutritionnelles : Ouagadougou, 23-28 / 11 / 2003
[consulté le : 7/12/2007]. Disponible sur :
http://spirulinagadez.free.fr/pdfs/Tchad_Sorto.pdf
309. Antenna Technologies France.
Programmes au Burkina Faso [en ligne].
[consulté le : 17/11/2007]. Disponible sur :
<http://www.antenna-france.org/42040/42067.html>
310. TECHNAP Spiruline.
Quelques réalisations et projets en cours [en ligne].
[consulté le : 19/10/2007]. Disponible sur :
<http://www.technap-spiruline.org/content/view/7/>
311. Antenna Technologies France.
Programmes au Niger [en ligne].
[consulté le : 17/11/2007]. Disponible sur :
<http://www.antenna-france.org/42040/43313.html>
312. Antenna Technologies France.
Programmes au Mali [en ligne].
[consulté le : 17/11/2007]. Disponible sur :
<http://www.antenna-france.org/42040/60238.html>
313. Antenna Technologies France.
Programmes à Madagascar [en ligne].
[consulté le : 17/11/2007]. Disponible sur :
<http://www.antenna-france.org/42040/59932.html>
314. Antenna Technologies Antsirabe.
Sa lutte contre la malnutrition à Madagascar [en ligne].
[consulté le : 17/11/2007]. Disponible sur :
<http://antenna-france.org/ATA2007.pdf>
315. Antenna Technologies Antsirabe.
Interview réalisée le 20 FEVRIER 2007 [en ligne].
c2001-2006. [consulté le : 17/11/2007]. Disponible sur :
<http://www.sobika.com/v2/interview/2007/spiruline.php>
316. Antenna Technologies.
Production locale de spiruline pour la lutte contre la malnutrition [en ligne].
c2004-2007. [consulté le : 17/11/2007]. Disponible sur :
<http://www.antenna.ch/malnutrition/spiruline-programme.html>

317. Antenna Technologies France.
Programmes en Inde [en ligne].
[consulté le : 17/11/2007]. Disponible sur :
<http://www.antenna-france.org/42040/66032.html>
318. Jourdan JP.
Petites nouvelles de la spiruline [en ligne].
c06/2005. [consulté le : 18/10/2007]. Disponible sur :
<http://spirulinefrance.free.fr/Resources/Juin%202005.pdf>
319. Fonds Mondial de la Solidarité contre la Faim.
De la spiruline au Chili [en ligne].
[consulté le : 19/10/2007]. Disponible sur :
<http://www.globenet.org/fmsfaim/francais/solarium.htm>
320. Jourdan J.P.
Solarium spirulina farm in the Atacama desert (North Chile).
Bulletin de l'Institut Océanographique de Monaco numéro spécial 12.
Monaco : Musée Océanographique ; 1993.

Table des matières

SOMMAIRE	1
LISTE DES ABREVIATIONS	5
INTRODUCTION	7
PREMIERE PARTIE : Présentation de la spiruline	11
1. La spiruline : généralités	13
1.1 Caractéristiques structurales	13
1.2 Croissance	18
1.3 Ecologie	21
1.4 Reproduction	24
1.5 Déplacement	24
2. La spiruline : de sa naissance à nos jours	25
3. Aspects nutritionnels	29
3.1 Analyse nutritionnelle qualitative et quantitative	29
3.1.1 Protéines	29
3.1.1.1 Teneur et composition	29
3.1.1.2 Utilisation protéique nette	31
3.1.1.3 Efficacité protéique	31
3.1.1.4 Rôle des protéines	32
3.1.1.5 Besoins de base en protéines pour l'organisme humain	32
3.1.2 Lipides	32
3.1.2.1 Lipides totaux	32
3.1.2.2 Acides gras	32
3.1.2.3 Lipides insaponifiables	34
3.1.2.4 Rôles des lipides et besoins spécifiques en acides gras essentiels	34
3.1.3 Glucides	35
3.1.4 Acides nucléiques	35
3.1.5 Vitamines	36
3.1.5.1 Le β -carotène (précurseur de la vitamine A)	36
3.1.5.2 Les tocophérols (vitamine E)	37
3.1.5.3 Les vitamines du groupe B	38
3.1.6 Minéraux	39

3.1.7 Oligo-éléments	40
3.1.7.1 Le fer	40
3.1.7.2 Le zinc	41
3.1.7.3 Le sélénium	42
3.1.7.4 L'iode	42
3.1.8 Phytonutriments et enzymes	43
3.1.8.1 Caroténoïdes naturels	43
3.1.8.2 Chlorophylle a	44
3.1.8.3 Phyco cyanine	44
3.1.8.4 Superoxyde dismutase	44
3.2 Synthèse des apports quantitatifs de la spiruline, en regard des apports recommandés	45
3.3 Préservation des nutriments et micro-nutriments jusqu'à la consommation	48
3.4 Tolérance et acceptabilité alimentaire	49
3.4.1 Toxicité	49
3.4.2 Réactions allergiques	51
3.4.3 Risques de surdoses	51
3.4.4 Précautions d'emploi	52
3.4.5 Acceptabilité par les consommateurs	53
3.4.6 Modes de consommation	54
3.4.6.1 Dans les pays en voie de développement	54
3.4.6.2 Dans les pays riches	55
4. Différents moyens d'obtenir de la spiruline	59
4.1 Exploitation des ressources naturelles	59
4.2 Cultures familiale et artisanale	60
4.2.1 Paramètres influençant la réussite des cultures de spiruline	60
4.2.1.1 Facteurs climatiques	60
4.2.1.2 Facteurs concernant les bassins de culture	61
4.2.1.3 Facteurs liés au milieu de culture	66
4.2.2 Démarrage et conduite des cultures	66

4.2.3 Récolte	75
4.2.3.1 Filtration	76
4.2.3.2 Lavage et essorage	77
4.2.3.3 Séchage	78
4.2.3.4 Broyage	81
4.2.4 Conditionnement et conservation	82
4.2.5 Contrôle de la qualité bactériologique du produit fini	84
4.2.6 Etudes toxicologiques	81
4.3 Culture industrielle	85
4.3.1 En quoi diffère-t-elle de la culture artisanale ?	85
4.3.2 Principales fermes industrielles implantées dans les pays industrialisés ou émergents	88
4.3.3 Trois exemples de culture artisanale en France	108
4.3.4 Quelques exemples de prix de vente de spiruline en France	113
4.4 Production en photobioréacteurs	115
DEUXIEME PARTIE : La spiruline dans les pays industrialisés	119
1. Différents secteurs d'activité utilisant la spiruline	121
1.1 Industrie agroalimentaire	121
1.1.1 Complément alimentaire pour les sportifs, les végétariens et les personnes faisant un régime amaigrissant	121
1.1.1.1 Utilité chez les sportifs	121
1.1.1.2 Utilité chez les végétariens	125
1.1.1.3 Utilisation comme adjuvant de régimes amaigrissants	126
1.1.2 Nourriture pour l'aquaculture et complément alimentaire pour certaines espèces animales	127
1.1.3 Colorant alimentaire	137
1.2 Industrie cosmétique	138
1.3 Médecine	140

1.3.1 Diagnostic biologique	140
1.3.2 Recherche génétique	141
1.4 Environnement	141
1.4.1 Diminution de la pollution environnementale (de l'atmosphère et des sols)	141
1.4.2 Baisse de la consommation en eau dans le domaine agroalimentaire	147
1.5 Recherche spatiale	148
2. Tour d'horizon des éventuelles propriétés thérapeutiques de la spiruline, d'après les résultats des recherches cliniques menées et publiées	150
2.1. Activité antioxydante et antiradicalaire	150
2.2. Effets sur le système immunitaire	153
2.2.1. Renforcement du système immunitaire chez différentes espèces animales	155
2.2.2. Activité antivirale	160
2.2.3. Effets anticancéreux	166
2.3 Activité détoxifiante et protectrice de certains organes	172
2.4 Action anti-inflammatoire	179
2.5 Effets radio protecteurs	181
2.6 Effets stimulants sur la lignée érythrocytaire	183
2.7 Effets sur l'hyperlipidémie, le diabète et l'hypertension artérielle	184
2.8 Effets sur la flore intestinale	188
2.9 Effets dans le cadre d'une déficience chronique en vitamine A	188

TROISIEME PARTIE : La spiruline dans les pays en voie de développement	191
1. Quelques définitions et données épidémiologiques autour de la malnutrition	193
1.1 La malnutrition	193
1.2 Le kwashiorkor	194
1.3 Le marasme	194
1.4 Le kwashiorkor marasmique	194
1.5 Données épidémiologiques	194
2. Causes de la malnutrition dans les pays du tiers-monde	199
2.1 Insécurité alimentaire des ménages	199
2.2 Insuffisance des services de santé et d'assainissement	200
2.3 Mauvaise qualité des soins apportés aux enfants et aux femmes	201
3. Manifestations cliniques et biologiques de la malnutrition	202
3.1 Aspects cliniques	202
3.1.1 En cas de kwashiorkor	202
3.1.2 En cas de marasme	203
3.1 Anomalies biologiques	204
4. Evolution et pronostic	206
5. Conséquences de la malnutrition à plus ou moins long terme	206
6. En quoi la spiruline représente-t-elle un espoir dans le combat contre la malnutrition ?	211

6.1	Réhabilitation nutritionnelle avec la spiruline au Burkina Faso	211
6.2	Evaluation de l'efficacité de la supplémentation en spiruline auprès d'enfants atteints de malnutrition sévère, au Niger	216
6.3	Essai de réhabilitation nutritionnelle au Sénégal	222
6.4	Etude sur les bénéfices nutritionnels de la spiruline, réalisée en Inde du sud	226
6.5	Etude menée en Chine	228
6.6	Etudes menées au Zaïre	229
6.7	Etude menée au Togo	230
6.8	Etude menée au Vietnam	231
7.	Problèmes rencontrés par les initiateurs de projets d'exploitation de spiruline dans ces pays	232
7.1	Première difficulté majeure : la maîtrise de la culture	232
7.2	Deuxième difficulté majeure : la formation du personnel local	233
7.3	Troisième difficulté majeure : la pérennité de l'exploitation	234
7.4	Quatrième difficulté majeure : le contexte économique mondial	236
8.	Conseils pour faciliter la réussite d'un projet d'exploitation de la spiruline sur du long terme	238
8.1	Choix des partenaires	238
8.2	Mission préparatoire	239
8.3	Rédaction et signature d'une convention de projet	239
8.4	Etude d'avant-projet	240
8.5	Recherche de fonds	240

8.6 Etude technique détaillée	240
8.7 Construction	240
8.8 Formation du personnel et démarrage de la culture	240
8.9 Suivi de l'exploitation, circuits humanitaires et commerciaux	243
9. Principales associations intégrant dans leurs projets, la culture de spiruline dans les PVD	245
9.1 Antenna Technologies	245
9.2 TECHNAP	246
9.3 CODEGAZ	246
9.4 Targuinca	247
9.5 CREDESA	248
9.6 OCADES	249
9.7 ALCMK	249
10. Exemples de productions locales de spiruline	251
10.1 En Afrique	251
10.1.1 BURKINA FASO	251
10.1.2 BENIN	255
10.1.3 NIGER	257
10.1.4 MALI	259
10.1.5 MADAGASCAR	261
10.1.6 Autres lieux de production locale	264
10.2 En Asie	265
10.3 En Amérique du sud	267

CONCLUSION	269
ANNEXES	275
BIBLIOGRAPHIE	285
TABLE DES MATIERES	323

PERMIS D'IMPRIMER

Thèse pour obtenir le **Diplôme d'Etat de Docteur en Pharmacie**

Présentée par :

Melle **Hélène CRUCHOT**

née le **25 mars 1971** à **Dole (39)**

Et ayant pour titre :

LA SPIRULINE – BILAN ET PERSPECTIVES

Vu,

Besançon, le 3 Avril 2008

Le Président de Thèse,



L. NICOD

Vu et Approuvé,

Besançon, le 3 Avril 2008

*Pour le Président et par délégation,
Le Doyen,
L'Assesseur en Pharmacie,*



Professeur Y. GUILLAUME

La Faculté a arrêté que les opinions émises dans les dissertations qui lui seront présentées, doivent être considérées comme propres à leurs auteurs et qu'elle n'entend ni les approuver, ni les imputer.