



Institut National des Sciences et
Techniques de la Mer



QUEL AVENIR POUR LA SPIRULINE ?



MEMOIRE BIBLIOGRAPHIQUE

ELYAH Ariel

DESTA PROMOTION 2001 - 2003



UNIVERSITE MONTPELLIER II
SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC

A.R.D.A.M.

Association de Ressource et de
Développement des Activités et
Métiers de l'environnement

SOMMAIRE

Introduction.....	1
I. Historique de la spiruline.....	2
II. Distribution géographique naturelle	3
III. Les multiples usages de la spiruline.....	5
III.1/ Approche nutritionnelle	5
III.2/ Approche thérapeutique	7
III.3/ Aquaculture et aquariophilie.....	8
IV. La culture de spiruline.....	8
IV.1/ Biologie de l'algue	8
IV.2/ Bases techniques de la production.....	9
IV.2.1/ Le milieu de culture	10
IV.2.2/ Lumière et agitation.....	12
IV.2.3/ Optimisation du rendement.....	12
IV.3/ Suivi des cultures	13
IV.4/ Les systèmes de culture.....	14
IV.4.1/ Les systèmes artisanaux.....	14
IV.4.2/ Les photobioréacteurs	16
IV.4.3/ Les fermes industrielles.....	17
V. Approche économique de la production.....	17
V.1/ L'évolution du prix de la spiruline séchée	18
V.2/ Le cas de Madagascar	18
VI. Les acteurs du développement de la culture de spiruline dans les PVD.....	21
VII. La spiruline, force ou rêve ?.....	22
Conclusion.....	23
Références bibliographiques	24

ANNEXES

INDEX DES TABLEAUX, IMAGES ET DIAGRAMMES

✍ **TABLEAUX :**

T1.	Zones potentiellement riches en spiruline	3
T2.	Tableau récapitulatif des vitamines en quantité utile	6
T3.	Composition en sels minéraux.....	6
T4.	Le milieu Zarrouk.....	11
T5.	Coût du système intégré	18
T6.	Coût des systèmes familiaux.....	19
T7.	Productions estimées des bassins - comparaison	19
T8.	Bilan estimatif	19

✍ **IMAGES :**

P1.	Collecte et vente de spiruline au Tchad	4
P2.	Spiruline en boîte pour la production de proies vivantes.....	8
P3.	Filaments de spiruline observés au microscope optique.....	9
P4.	Exemples de laboratoire de contrôle	14
P5.	Plan de construction d'un bassin artisanal	16
P6.	Exemples de photobioréacteur	17
P7.	Lac aménagé de Sosa Texcoco.....	17
P8.	Système avancé de bassins thaïlandais	17
P9.	Bassins géants de Earthrise Farm	17
P10.	Période de récolte à Myanmar	17
P11.	Bassin en dur togolais	17
P12.	Photobioréacteurs industriels	22

✍ **DIAGRAMMES :**

D1.	Diagramme récapitulatif des paramètres de culture et de traitement de la spiruline	10
D2.	Principe du système intégré	15
D3.	Schéma du système intégré proposé à Toliara	20

INTRODUCTION :

Changeant d'aspect selon le contexte géographique et économique, la question de la malnutrition est devenue plus que jamais internationale. Surpoids et obésité d'une part, diverses carences d'une autre. Conscients d'une suralimentation nuisible dans les pays développés, les services de santé concernés ne cessent de sensibiliser la population à manger raisonnablement, et des produits diététiques coûteux sont mis en vente à cet effet.

A l'inverse, plusieurs organismes ont été mis en place depuis la création de l'ONU pour combattre la faim et la sous-alimentation dans le Tiers-Monde, où le faible pouvoir d'achat fait obstacle à l'équilibre alimentaire.

Quelle solution l'aquaculture apporte-t-elle à ce fléau à double face?

Désormais, nous disposons d'une nouvelle arme pour le combattre depuis la redécouverte de la spiruline au Tchad en 1940. A peine un siècle plus tôt, qui aurait pu présager que c'est une bactérie qui apporterait une solution plausible au problème ?

La spiruline est une cyanobactérie comestible, extrêmement riche en protéines, acides gras essentiels, vitamines et divers oligo-éléments.

Alliant facilité de culture, haute productivité et faible coût de production par rapport aux autres produits aquacoles, elle pourrait bien devenir un aliment de référence universelle dans les prochaines années.

Ce rapport ne se limite pas à présenter la spiruline sous un angle purement scientifique et technique, mais se consacre aussi à son étude économique, ses nouvelles utilisations et ses promesses.

I) HISTORIQUE DE LA SPIRULINE :

Les cyanobactéries, cyanobiontes ou encore cyanophycées selon les préférences, sont la famille d'algues bleues-vertes à laquelle appartient la spiruline, qui elle-même peut être indifféremment appelée *Arthrospira sp.* ou *Spirulina sp.*.

Des traces de cyanobactérie ont déjà été détectées dans des stromatolithes (restes de filaments d'algue pétrifiés dans du calcaire) datant de quelques 3.7 milliards d'années, en Afrique du Sud (Perez, 1997).

La spiruline, bien que déjà décrite par Wittrock et Nordstedt en 1844, ne fut vraiment redécouverte qu'en 1940 au Tchad par un botaniste français du nom de Dangeard. Les Kanembous, tribu du Tchad, la consomment encore de nos jours sous le nom de Dihé.

Depuis, on a su par les archives mexicaines que la spiruline était aussi consommée du temps des Aztèques (Farrar, 1966), bien avant l'arrivée des Espagnols, sous le nom de Tecuitlatl.

Depuis la mise en place de la culture en masse des microalgues à la fin des années 50, elle connaît un regain de popularité pour l'alimentation humaine.

Cependant, cette cyanobactérie resta une simple curiosité avant le 7ème congrès du pétrole en 1967 à Mexico, à l'occasion duquel des chercheurs de l'Institut Français du pétrole rendirent compte de leurs travaux sur la spiruline, qui jusque là sont restés confidentiels.

Ce fut l'origine de sa première exploitation industrielle, en 1976, par la société Sosa Texcoco basée au Mexique. Depuis, plusieurs entreprises se sont implantées un peu partout : Siam Algae Company à Bangkok en 1979, Earthrise farm aux Etats-Unis en 1983 (le plus gros producteur actuel), Cyanotech Corporation à Hawaï, etc. En 1995, il existe une vingtaine d'exploitations industrielles dans le monde (Fox, 1999). Actuellement, leur nombre avoisine la trentaine.

La première culture artisanale de spiruline méritant vraiment cette appellation revient sans doute à Fox Ripley qui fut le premier à lancer cette activité en Inde en 1973, en collaboration avec le Navsari Agricultural College.

Depuis, maints progrès ont été faits pour permettre et améliorer son exploitation dans toutes les régions du monde, à petite échelle. Comme nous le verrons ultérieurement, ces micro-projets sont en partie financés par des associations de lutte contre la malnutrition.

Mais avant, il est important de connaître les quelques régions du globe où elle pousse naturellement.

II) DISTRIBUTION GEOGRAPHIQUE

NATURELLE :

La spiruline croît naturellement dans la ceinture tropicale du globe, entre 35°N et 35°S environ. Elle arbore plusieurs différences interspécifiques selon son origine. Les deux espèces les mieux connues sont *Spirulina platensis* et *Spirulina maxima*.

T1. Zones potentiellement riches en spiruline (Fox, 1999):

AFRIQUE	
Algérie	Tamanrasset
Tchad	Région du Kanem : lacs Latir, Ouna, Borkou, Katam, Yoan, Leyla, Bodou, Rombou, Moro, Mombolo, Liwa, Iseïrom, Ounianga kebir
Soudan	Cratère de Djebel Marra
Djibouti	Lac Abber
Ethiopie	Lacs Aranguadi, Lesougouta, Nakourou, Chiltu, Navasha, Rodolphe
Congo	Mougounga
Kenya	Lacs Nakuru, Elmenteita, Cratère, Natron
Tanzanie	Lac Natron
Tunisie	Lac Tunis; Chott el Jerid
Zambie	Lac Bangweoulou
Madagascar	Beaucoup de petits lacs près de Toliara
ASIE	
Inde	Lacs Lonar et Nagpur
Myanmar	Lacs Twyn Taung, Twyn Ma et Taung Pyank
Sri Lanka	Lac Beira
Pakistan	Mares près de Lahore
Thaïlande	Lacs d'effluents d'une usine de tapioca, province de Radburi, 80 km au S.O. 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 Quilotoa : cratère de 1km de diamètre
AMERIQUE DU NORD	
Californie	Oakland ; Del Mar Beach
Haïti	Lac Gonâve
République Dominicaine	Lac Enriquillo

EUROPE	
Hongrie	
France	Camargue
AUTRES SITES POSSIBLES	
Partout où vivent le flamant nain, <i>Phoenicoenaias minor</i> (Afrique et Asie) et le flamant de James, <i>Phoenicoparrus jamesi</i> (Amérique du sud)	
Ethiopie	Lac Abiata
Kenya	Lac Rodolphe ; lac Hannington
Tanzanie	Lac Manyara ; lac Rukua
Zambie	Lac Mweru
Botswana	Makgadigka Salt Pans
Namibie	Etosha Salt Pan
Afrique du Sud	Etat libre d'Orange, près de Vaaldam
Bolivie	Lacs Colorado, Poopo, Chelviri, Salar de Uyuni
Chili	Aguas Calientes, Lagunas Brava, lac Vilama, Salar de Surire
Mauritanie	Côte sud
Inde	Rann of Kutch ; Gujarat
Madagascar	Côte Ouest

Comme nous pouvons le voir sur ce tableau, la spiruline peut même pousser dans des lacs volcaniques (lac Quiliotoa, en Equateur). Plus généralement, elle croît dès que l'eau est riche en carbonate ou bicarbonate de sodium, d'autres minéraux et une source d'azote fixé. C'est pourquoi on peut en trouver aussi dans certains déserts, à l'endroit de ramassage de l'eau provenant occasionnellement des montagnes (Fox, 1999).

P1. Collecte et vente de spiruline(Dihé) au Tchad :



Les scientifiques ont cherché à reproduire artificiellement ces conditions pour en disposer à tout moment et en tout lieu. Ce qui nous amène à la question suivante : pourquoi cette cyanobactérie attire-t-elle tant d'attention ?

III) LES MULTIPLES USAGES DE LA SPIRULINE :

De par sa composition, la spiruline nous offre plusieurs filières d'applications. Il n'est pas inutile de rappeler que la composition de *Spirulina maxima* diffère légèrement de celle de *Spirulina platensis*.

III.1/ APPROCHE NUTRITIONNELLE :

La spiruline est connue pour sa richesse en protéines, qui constituent entre 50 et 70% de son poids sec. Ces protéines ont en plus l'avantage d'être facilement assimilable par l'organisme, ce qui évite l'emploi de la cuisson qui altère les nutriments et les vitamines. Les acides aminés essentiels représentent 47% du poids total des protéines (Bujard & al., 1970).

La digestibilité de la spiruline est en plus accrue par l'absence de paroi cellulosique dans la cellule, remplacée par une enveloppe de muréine fragile.

L'efficacité protéique (PER) d'un aliment est déterminé par le rapport « Gain de poids de l'animal ou de l'individu / poids de protéines ingérées ». La protéine de référence est souvent le lactalbumine ou bien la caséine, laquelle présente un PER de 2.5. La spiruline seule, au cours d'expériences menées sur le rat, a un PER de 1.90, tandis qu'accompagné de riz dans une proportion égale, cette valeur s'élève à 2.40 (Anusuya & Venkataraman, 1983).

Les lipides totaux représentent 5.6 à 7% du poids sec de la spiruline, parfois jusqu'à 11% selon le système d'extraction utilisé. Ils se subdivisent en fraction saponifiable (83%) et en fraction insaponifiable (17%). Les acides gras font partie de la première fraction : l'acide ω -linoléique en constitue 10 à 20% chez *Spirulina maxima* et jusqu'à 40% chez *Spirulina platensis*, soit jusqu'à 4% de son poids sec total (Falquet, 1996). La spiruline figure ainsi parmi les meilleures sources d'acide gras essentiel, avec quelques huiles végétales peu connues (huile d'onagre, de bourrache, de cassis). Rappelons que ces acides sont des précurseurs des prostaglandines qui jouent le rôle de médiateurs chimiques dans les réactions inflammatoires et immunitaires. Une déficience prolongée en ces acides gras peut être à l'origine de thrombose, d'arthrite, d'accidents vasculaires cardiaques et cérébrales (Venkataraman, 1998)

L'autre fraction insaponifiable est composée de stérols, de terpènes et de paraffines. Certains de ces stérols pourraient partiellement expliquer l'activité antimicrobienne de la spiruline (Clément, 1975).

Les glucides, constitués en majeure partie de polysaccharides représentent 15 à 25% de la matière sèche des spirulines, mais la seule substance glucidique intéressante pour son apport minéral, entre 350 et 850mg par kg de matière sèche, est le méso-inositol phosphate qui est une excellente source de phosphore organique (Quillet, 1975).

La richesse en acides nucléiques d'un aliment peut induire à terme des calculs rénaux et des crises de goutte parce que ces derniers se dégradent partiellement en acide urique dont l'excès provoque ces maux. On admet que la dose maximale d'acides nucléiques admissible à long terme est de 4g/j pour un adulte, l'ARN produisant 2 fois plus d'acide urique que l'ADN. La spiruline renferme 4.2 à 6% d'acides nucléiques totaux (Falquet, 1996). En prenant une moyenne de 5%, la limite quotidienne

admissible est donc le contenu de 80g de spiruline sèche, soit 8 fois la dose recommandée comme supplément alimentaire. A cette dose, il n'y a donc pas de risque.

T2. Tableau récapitulatif des vitamines en quantité utile :

Vitamines	Teneur dans 10g de Spiruline (mg)	Besoins quotidiens en vitamine (mg)
?-carotène (provitamine A)	7 à 17	< 1
Vitamine E (tocophérols)	0.5 à 1.9	12
Vitamine B12	1.5 E-2 à 2 E-2	0.3 E-2

Même si la teneur en vitamine E de la spiruline est insuffisante pour satisfaire l'apport journalier recommandé, ses propriétés anti-oxydantes pour les acides gras insaturés expliquent la bonne conservation de ces derniers dans la spiruline séchée.

Toujours sur cette lancée nutritionnelle, une étude de 1993 portant sur 5000 enfants indiens d'âge pré-scolaire a montré la surprenante efficacité d'une dose quotidienne de 1 gramme de spiruline sur leur déficience chronique en vitamine A. Après 5 mois, la proportion d'enfants sérieusement carencés en vitamine A présentant le symptôme de la "tache de Bitot" sur la conjonctive de l'œil, est passée de 80% à 10%. (Seshadri, 1993).

Elle renferme aussi à plus faible quantité les vitamines hydrosolubles B1-B2-B6, du folate, du panthoténate et de la biotine.

T3. Composition en sels minéraux :

Minéraux	Teneur dans 10g de spiruline (mg)	Doses requises (mg/jour)
Calcium	13 - 140	1200
Phosphore	67 - 90	1000
Magnésium	20 - 29	250-350
Fer	5.80 - 18	18
Zinc	0.21 – 0.40	15
Cuivre	0.08 – 0.10	1.5 - 3
Chrome	0.028	0.5 - 2
Manganèse	0.25 – 0.37	5
Sodium	45	500
Potassium	64 - 154	3500

Parmi les éléments minéraux contenus dans la spiruline, le fer est sans doute le plus parlant. Les carences en fer à l'origine de l'anémie sont très répandues, surtout chez les femmes enceintes et les enfants, et lorsque les bonnes sources alimentaires de fer sont rares. Les céréales complètes, classées parmi les meilleures sources de fer, n'en contiennent que 150 à 250mg par kg. En plus, elles sont riches en acides phytique et en polymères phosphatés qui limitent fortement la biodisponibilité de leur fer. D'autre part, les suppléments sous forme de sulfate ferreux deviennent toxiques à forte dose et causent quelquefois des diarrhées. Dans le cas de la spiruline, la biodisponibilité du fer a été démontrée tant chez le rat que chez l'homme (Johnson & Shubert, 1986).

III.2/ APPROCHE THERAPEUTIQUE :

On serait tenté d'affecter à la spiruline une image de potion magique, tellement ses propriétés médicales sont variées. Ce n'est pas moins un remède contre de nombreuses pathologies. Nous ne citerons ici que quelques unes de ces propriétés.

Après plusieurs années de recherche pour essayer de comprendre l'origine du cancer, il transparaît aujourd'hui comme étant le résultat d'un processus qui aboutit à la formation de radicaux libres dans l'organisme, suite à l'influence de différents facteurs tels que le stress physique et émotionnel, la pollution, etc. Ces radicaux libres peuvent endommager l'ADN, les protéines structurales, les enzymes et les membranes cellulaires et conduire à la formation de produits toxiques – et à terme au cancer. Pour éliminer ces radicaux libres, notre organisme a besoin d'apports en vitamines anti-oxydantes, caroténoïdes et autres micro-nutriments. Le β -carotène, présent en quantité très importante dans la spiruline, est l'un des principaux caroténoïdes impliqués dans ce système de défense de l'organisme (Fedkovic & al., 1993). En 1995, une étude menée à Kerala sur des preneurs de chique a montré que chez 45% de ceux ayant avalé 1g de spiruline par jour pendant un an a été constaté la régression d'un cancer oral, contre 7% chez ceux qui ont juste pris un placebo. Pourtant après 1an de non-prise, 45% des lésions cancéreuses réapparaissent (Babu & al., 1995). La spiruline agit donc à moyen terme et s'avère plus efficace en traitement continu.

En 1996, des chercheurs japonais découvrent et baptisent « Calcium-spirulan » un extrait aqueux de spiruline particulièrement riche en calcium et en soufre. Le calcium-spirulan empêche la pénétration de la membrane cellulaire par certains virus comme le VIH-1, le Herpes Simplex, le virus de la grippe de type A et le virus de la rougeole. Les essais effectués sur des hamsters contaminés par le Herpès virus léthal ont montré un taux de rétablissement très prometteur (Hayashi et al., 1996).

Les polysaccharides et la phycocyanine de la spiruline sont aussi connus pour leur effet immunostimulant.

Le diabète résulte de troubles au niveau des taux sanguins d'insuline - hormone pancréatique qui permet de transformer le sucre présent dans le sang en énergie. Le diabète type 1 survient à un âge jeune résulte d'un manque d'insuline. Le diabète type 2 dit non insulino-dépendant (NIDDM) survenant à l'âge adulte résulte de l'incapacité de l'organisme à fabriquer l'hormone de manière efficace (Capet & al., 1999). C'est le type le plus répandu. Il a été prouvé que la spiruline agit sur ce type de diabète en réduisant le taux sanguin de sucre et de cholestérol. L'ingestion quotidienne de spiruline est recommandée pour le contrôle du taux glyco-lipidique chez les diabétiques (Mani & al., 1996).

Plusieurs produits pharmaceutiques destinés au soin des blessures contiennent de la spiruline. Une substance anti-bactérienne et anti-fongique a été identifiée en particulier chez *Spirulina platensis* ; d'autres auteurs mentionnent que c'est une propriété commune à toutes les spirulines. D'autres applications médicales de ces substances antibiotiques sont à envisager.

La phycocyanine est aussi utilisée en imagerie médicale comme traceur fluorescent. Une fois purifiée, elle coûte entre 8000 et 40000\$ le gramme. Ce prix est justifié par la netteté d'image obtenue même sans utiliser de marqueur radioactif (Henrikson, 1999).

III.3/ AQUACULTURE ET AQUARIOPHILIE :

La spiruline n'est pas exclusivement réservée à la consommation humaine. En aquaculture, elle sert notamment à enrichir les granulés pour poissons (Sironval, 1993). Sa présence dans l'alimentation des poissons a des effets que les éleveurs recherchent et apprécient. En aquariophilie, sa première application concerne la pigmentation qu'elle induit chez les poissons par sa richesse en caroténoïdes ; chez la carpe Koï, ces pigments renforcent les motifs rouges et jaunes, tout en laissant un blanc pur brillant. Pour ce faire, son régime alimentaire doit inclure entre 5 et 20% de spiruline. Au Japon, ses qualités de pigmentation lui ont valu d'être employé pour la coloration des poissons servant à préparer le sushi, mais aussi des crustacés. D'autre part, sa richesse naturelle en nutriments en fait un complément alimentaire bénéfique pour les poissons tropicaux d'aquarium (Henson, 1993).

En élevage larvaire, elle est utilisée à hauteur de 1 à 10% de l'alimentation pour augmenter la résistance immunologique des larves (Henrikson, 1999). Toutefois, des recherches plus détaillées doivent être effectuées afin de pouvoir affirmer la réelle efficacité de la spiruline dans ce domaine. On l'utilise aussi dans la production de proies vivantes comme l'*Artemia* et les daphnies.

P2. Spiruline destinée à la production de petites quantités de proies vivantes



IV) LA CULTURE DE SPIRULINE :

IV.1/ BIOLOGIE DE L'ALGUE :

Les cyanobactéries, famille de microorganismes à laquelle on inclut la spiruline, sont des bactéries Gram négative, faisant le même type de photosynthèse que les végétaux supérieurs (Lindblad et al., 1998). Elles colonisent des milieux très divers : eau douce, eau de mer, eau saumâtre, et même en écosystème terrestre. Plusieurs d'entre elles peuvent fixer l'azote atmosphérique : ce sont les espèces à hétérocyste qui pullulent dans les étangs piscicoles riches en phosphate. Certaines sont toxiques. D'autres, qui sont utilisées comme engrais, aliment, source d'énergie ou de produits chimiques présentent un intérêt économique certain.

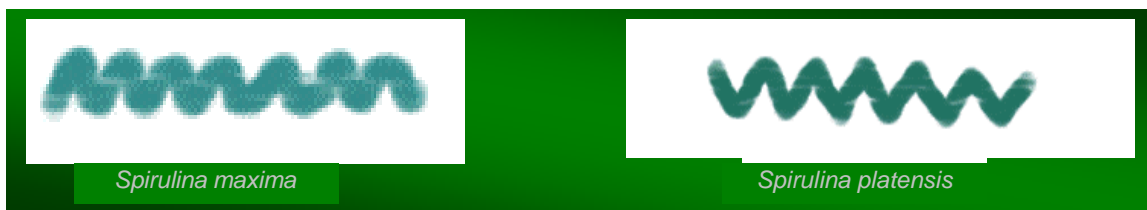
Comme les cyanobactéries se trouvent à la frontière du monde des végétaux et des bactéries, plusieurs définitions ont été attribuées à la spiruline. En référence, Richmond la décrit comme un microorganisme à filaments bleu-vert, mobiles, composés de cellules cylindriques disposées en trichomes hélicoïdaux. Ces filaments tournent autour de leur axe ; la spiruline n'a pas d'hétérocyste,

elle ne peut donc pas fixer l'azote libre. La forme hélicoïdale du trichome, observable uniquement en milieu liquide est caractéristique du genre, mais les paramètres de l'hélice (épaisseur, longueur) varient selon les espèces, et même chez une même espèce (Richmond, 1986).

L'espèce mexicaine *Spirulina maxima* se caractérise par des trichomes de 7 à 9 μ de diamètre, de 70 à 80 μ de long, légèrement effilés aux extrémités, formant une spirale régulière de 3 à 8 tours et de 40 à 60 μ de diamètre. Les cellules constituant les trichomes mesurent 5 à 7 μ de long et ne rétrécissent pas au niveau des articulations.

L'espèce du Tchad *Spirulina platensis* se compose de trichomes atteignant 350 μ de long, de 5 à 11 μ de diamètre, un peu rétrécis au niveau des articulations. Les tours de spire ont un diamètre de 20 à 50 μ , diminuant légèrement vers les extrémités (Fox, 1999).

P3. Filaments de spiruline observés au microscope optique :



IV.2/ BASES TECHNIQUES DE LA PRODUCTION :

L'environnement doit comprendre une zone de température convenant à la plante, de la lumière fournissant l'énergie pour la photosynthèse, et de l'eau ; avec en plus, en algoculture, un certain mouvement de l'eau pour assurer une répartition moyenne de la lumière et des éléments nutritifs. Un équilibre acido-basique et un pH favorables à la plante doit être maintenu, un rythme de récolte et d'ajout d'éléments nutritifs doit être établi et la culture doit se faire dans un système ou un bassin convenablement conçu.

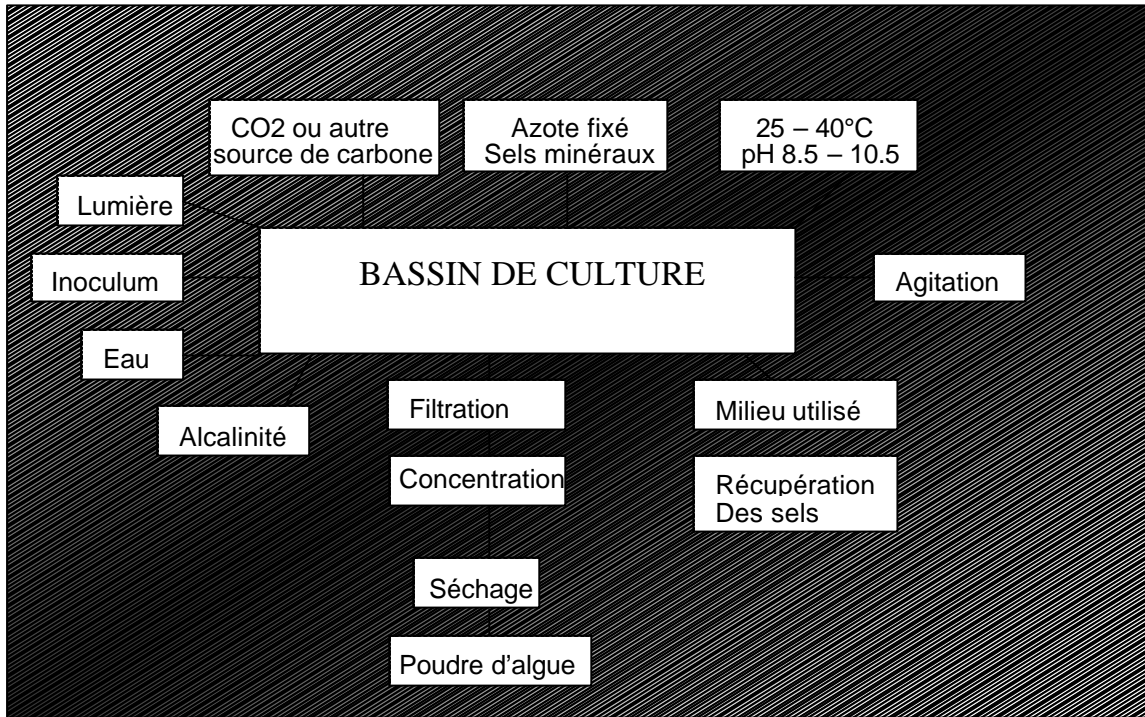
Dans le cas de la spiruline, la croissance optimale est obtenue pour une température de 34° à 40°C, avec une population dense, un ensoleillement généreux, un pH de 8.5 à 10.5 ; les éléments nutritifs essentiels doivent être en quantité suffisante (le manque d'un d'entre eux inhibe la croissance), l'eau doit être suffisamment agitée.

Une intensité lumineuse élevée sans agitation conduit à la photolyse des microalgues. Une forte intensité lumineuse conjuguée avec une forte agitation donne la croissance optimale – tous les filaments reçoivent des charges de lumière fréquentes et sont ensuite rapidement protégés d'une exposition trop longue par les autres filaments. En lumière et agitation faibles, la croissance est lente, mais la pigmentation plus marquée, c'est-à-dire que la couleur est d'un vert plus foncé et le bleu de la phycocyanine apparaît (Fox, 1999).

Le CO₂ étant moins soluble dans l'eau chaude que dans l'eau froide, l'élévation de la température réduit son taux, limitant la croissance. Une température trop basse réduit aussi la croissance. Donc, dans la zone de 34 à 40°C, l'addition de CO₂ stimule la croissance.

Un pH élevé est alcalin. L'addition de CO₂ forme de l'acide carbonique, qui abaisse le pH. En absorbant le CO₂ par photosynthèse, les algues remontent le pH. Le pH optimum pour la croissance de la spiruline est autour de 9.5.

D1. Diagramme récapitulatif des paramètres de culture et de traitement de la spiruline :



Le premier point que nous allons aborder en raison de son importance fondamentale pour la réussite d'une production concerne le milieu de culture.

IV.2.1/ Le milieu de culture :

Les spirulines poussent dans une eau à la fois salée et alcaline. L'eau utilisée pour le milieu de culture doit être de préférence potable (toutefois sans excès de chlore à défaut de tuer les algues) ou au moins filtrée, le plus important étant l'élimination des algues étrangères. Une eau dure produira des boues minérales (plus ou moins abondantes selon la teneur en calcium, magnésium et fer), qui décantent rapidement et n'encombrent pas particulièrement la culture, à condition que l'ensemencement initial en spirulines soit assez concentré. La composition des milieux de culture peut varier énormément, selon la disponibilité des produits chimiques nécessaires à leur élaboration.

Les limites de salinité et d'alcalinité permises sont généralement assez larges mais on se place souvent vers les minima, cela pour des raisons d'économie et de productivité, avec une salinité totale de 13 g/l ; lorsque le carbone est apporté par le bicarbonate, on a intérêt à travailler à forte alcalinité pour réduire le volume des purges (Jourdan, 1997).

L'alcalinité est habituellement apportée par du bicarbonate de sodium (NaHCO_3), mais ce dernier peut être remplacé en partie par de la soude caustique ou du carbonate de sodium (Na_2CO_3) pour relever le pH initial du milieu de culture (par exemple 5 g/l de bicarbonate + 1,6 g/l de soude donnent un pH de 10) ; le carbonate ou la soude peuvent même être la seule source d'alcalinité à condition de les transformer en bicarbonates par addition de CO_2 ou par exposition à l'air avant usage. La salinité complémentaire est apportée par les différents engrais et du chlorure de sodium. Le sel de cuisine iodé et fluoré peut convenir mais souvent il contient jusqu'à 2 % de magnésium insoluble : mieux vaut utiliser un sel n'en contenant pas ; par contre l'emploi d'un sel peu raffiné est recommandé à cause de sa teneur en oligo-éléments. Si le sel apporte trop de magnésium, il y aura floculation de sels

minéraux insolubles, surtout à pH assez élevé, ce qui peut être très gênant pour une culture qu'on ensemence peu concentrée en spiruline : celle-ci est en effet facilement entraînée par les flocculants et tombe au fond sans qu'on puisse la récupérer. C'est aussi pour cette raison que l'on évite l'addition de calcium lors d'un lancement de nouvelle culture. En plus du sel et de la soude, le milieu de culture contient des engrais pour assurer la croissance des spirulines comme en agriculture habituelle : l'azote, le phosphore, le potassium sont les éléments classiques, mais le soufre, le magnésium, le calcium et le fer doivent aussi être ajoutés s'ils ne sont pas apportés en quantité suffisante par l'eau, le sel et les engrais. Une analyse préparatoire de l'eau et du sel est utile pour calculer la dose de Mg, Ca et Fe à ajouter car un excès de ces éléments est nocif (perte de phosphore, floculation). L'eau, le sel et les engrais apportent généralement assez de micro-éléments (bore, zinc, cobalt, molybdène, cuivre, etc.).

Les sources d'azote préférées des spirulines sont l'ammoniac et l'urée, mais ces produits sont toxiques au-delà d'une concentration limite à respecter impérativement. C'est pourquoi on préfère souvent, au moins lors de la préparation du milieu de culture, utiliser un nitrate que l'on peut mettre à forte dose, constituant une réserve d'azote à long terme. Les spirulines consommeront d'abord l'ammoniac ou l'urée s'il y en a de disponibles. Une odeur persistante et forte indique qu'on a dépassé la limite en ammoniac et qu'il faut s'attendre à un mauvais état de la culture, passager ou irréversible selon la dose d'ammoniac présent (Jourdan, 1997).

Le milieu Zarrouk, référence dans ce domaine, présente la composition suivante (Fox, 1999 ; Jourdan, 1997):

T4. Le milieu Zarrouk

COMPOSITION DU MILIEU DE BASE (en g/l de solution aqueuse)	
NaHCO ₃	16.8
K ₂ HPO ₄	0.5
NaNO ₃	2.5
K ₂ SO ₄	1.0
NaCl	1.0
MgSO ₄ , 7 H ₂ O	0.2
CaCl ₂	0.04
FeSO ₄ , 7 H ₂ O	0.01
EDTA (acide éthylène diamino tétracétique)	0.08
1ml de A ₅ + 1ml de B ₆ pour chaque litre de milieu de base	
COMPOSITION DE LA SOLUTION A5 (en g/l)	
H ₃ BO ₃	2.86
MnCl ₂ , 4 H ₂ O	1.81
ZnSO ₄ , 7 H ₂ O	0.22
CuSO ₄ , 5 H ₂ O	0.08
MoO ₃	0.015

COMPOSITION DE LA SOLUTION B6 (en mg/l)	
NH ₄ VO ₃	22.9
K ₂ Cr ₂ (SO ₄) ₄ , 24 H ₂ O	96.0
NiSO ₄ , 7 H ₂ O	47.8
Na ₂ WO ₄ , 2 H ₂ O	17.9
Ti ₂ (SO ₄) ₃	40.0
Co(NO ₃) ₂ , 6 H ₂ O	44.0

Ce milieu présente l'intérêt de s'adapter à presque toutes les souches de spiruline et simplifie considérablement le travail de l'algoculteur. Toutefois, ses constituants sont chers et ne sont pas toujours faciles à trouver. Plusieurs alternatives offrent des rendements satisfaisants ; nous ne pourrions pas les détailler tous, mais il faut savoir qu'on peut utiliser la lessive de cendres de bois ou encore le bicarbonate naturel (natron) additionnés d'urine ou de nitrate de Chili comme milieux de culture (Jourdan, 1997).

IV.2.2/ Lumière et agitation :

Comme en diminuant l'éclairement on diminue aussi la photosynthèse totale, il faut si possible éviter la photolyse autrement. Deux conditions sont nécessaires. Primo, ensemercer le bassin avec assez d'algues pour que la lumière ne puisse pas atteindre le fond du bassin. La vérification peut se faire avec un simple disque de Secchi. Secundo, agiter suffisamment la culture pour que les filaments individuels ne restent pas plus d'une demi-minute à la surface en plein soleil, mais plongent et remontent fréquemment. Les roues à aubes constituent les systèmes d'agitation les plus utilisés; le but est de remuer l'eau et non de créer un dénivellement comme on le croit généralement (Fox, 1999). L'emploi de longues roues à aubes flottantes est tout à fait possible dans de grands bassins peu profonds, car plus le bassin est grand, plus il est difficile de maintenir une roue à aubes conventionnelle. Au-delà de 4 à 5 m de longueur, il faut un palier intermédiaire qui sera dans le courant. Avec un bassin garni d'un film plastique, c'est difficile à réaliser en gardant l'étanchéité. La solution des longues roues est moins chère et demande moins d'énergie.

Théoriquement, la photosynthèse la plus rapide serait obtenue avec une cadence des cycles ombre – lumière de mille par seconde ou plus. Pour le moment, ce n'est possible qu'en laboratoire. On peut tout de même obtenir une alternance de lumière et d'ombre toutes les quelques secondes, en mettant des déflecteurs dans le courant d'eau pour induire des turbulences; ainsi, on peut tripler facilement la production de biomasse – environ 30 g d'algue sèche par m² et par jour – par rapport à celle d'un bassin simplement agité par une roue à aubes (Fox, 1999).

IV.2.3/ Optimisation du rendement :

La turbulence induite ramène le risque de photolyse pratiquement à rien. Après le couple de paramètres lumière/agitation, reste la température. Comme tout être photosynthétique, la spiruline perd de la biomasse sous forme de CO₂ pendant la respiration. Cette perte est plus grande si l'eau est plus chaude.

Si la température nocturne est basse, il y a peu de perte de la biomasse produite pendant le jour. Le mieux serait une nuit froide et un réchauffement immédiat de l'eau au lever du soleil pour avoir une photosynthèse maximale pendant le jour, en tenant compte que la spiruline présente une croissance

optimale à 35°C. Comme elle possède des pigments aptes à absorber l'énergie de tout le spectre visible, la photosynthèse est là à son maximum. Si on crée une turbulence à l'aide de déflecteurs creux, dans lesquels circule de l'eau chaude au lever du soleil, la photosynthèse démarre tout de suite à plein quand il faudrait environ 3H pour que l'eau soit suffisamment chauffée par le soleil seul.

Avec ces améliorations, la production d'un bassin enrichi en CO₂ et agité par des roues à aubes peut être considérablement améliorée. 10 g d'algue sèche par jour et par m² est un chiffre fréquent chez les producteurs commerciaux. Comme signalé précédemment, les déflecteurs peuvent tripler cette production. Si la culture est chauffée au lever du soleil, elle produit pendant un temps allongé de 30%. En ajoutant la moindre perte pendant la nuit, on peut compter sur environ 40g d'algue sèche/m²/j (Fox, 1999).

IV.3/ SUIVI DES CULTURES :

Le diagnostic des couleurs fournit généralement une bonne appréciation de l'état de la culture (Fox, 1999).

Une couleur pâlie indique souvent un manque d'azote fixé et/ou de CO₂. Et aussi, que du magnésium est nécessaire. Si l'examen au microscope ne montre qu'une couleur pâlie, il faut vérifier le pH. Au delà de 10.5, il y a manque de CO₂ (ou de bicarbonate). Une couleur pâlie, surtout manquant de pigment bleu (phycocyanine), avec un pH en dessous de 10.5, indique le manque d'azote fixé.

Si la couleur pâle est due à des cellules « vides », la culture a probablement été stressée, soit par un changement brusque de pH, soit surtout par une brusque modification de la pression osmotique dans les cellules. S'il y a de l'écume, cela peut indiquer qu'en essayant d'équilibrer la pression dans les cellules avec celle du milieu brusquement plus chargé, la cellule a concentré son cytoplasme en expulsant les molécules plus légères. Dans ce cas, il faut ramener la salinité totale à son niveau d'origine. Bien des algues mourront si le choc osmotique a été sévère. D'autres survivront et redémarreront la culture à la nouvelle salinité. Le problème est d'éliminer les cellules mortes et les polysaccharides gélatineux libérés dans l'eau. Les masses gélatineuses piègent les filaments d'algues vivants, et finalement les entraînent au fond, où ils meurent faute de lumière et d'accès aux éléments nutritifs.

Une agitation renforcée de la culture aide à maintenir à flot les polysaccharides et aide aussi les filaments à ne pas être pris dans les amas de polysaccharides, où les algues mourront. Les bactéries consommeront les polysaccharides, seront à leur tour consommées par les protozoaires. Ceux-ci mourront quand ils auront dévoré les bactéries au point de dépenser plus d'énergie à les poursuivre qu'ils n'en tirent de leur absorption. Alors le milieu sera reminéralisé et prêt pour les algues.

Si, sous forte lumière, la culture est jaune ou vert-olive, il y a photolyse, ou destruction de la chlorophylle. Dans les conditions les plus sévères : forte intensité lumineuse, sursaturation en oxygène et faible température, on peut perdre la culture en quelques heures. Une agitation renforcée peut réduire la concentration en oxygène et si possible la culture doit être ombragée. Quand la lumière est très intense, il faudra aussi une température élevée (vers 38°C), une population dense et une forte agitation (turbulence) de la culture. Ces conditions favorisent la meilleure productivité.

Une couleur jaunâtre avec écume peut signifier que les parois des cellules sont rompues, en expulsant des polysaccharides dans l'eau. Là aussi, il faut ombrager. Pour de petits bassins, on peut employer du filet plastique noir comme dans les serres horticoles, ou du tissu, ou des feuilles de palmier. On peut aussi abaisser le pH en jouant sur le CO₂ ou le bicarbonate et ajouter de l'azote fixé

et du potassium. Les grands bassins peuvent être protégés de la lumière par une agitation renforcée, qui, à la fois, renvoie plus de lumière et amène plus souvent les algues du fond à la surface pour protéger celles qui y sont.

Si la culture est jaunâtre sur un fond d'eau grisâtre ou laiteux, les algues souffrent d'un défaut de carbone et peut-être d'azote, et de plus il y a beaucoup de bactéries.

Normalement les bactéries n'attaquent pas les algues, surtout si le brassage est rapide (mais pas trop pour briser les filaments).

Quand il n'y a plus de polysaccharides pour les bactéries, elles meurent.

S'il n'y a pas de couleur, les algues sont piégées dans des amas de polysaccharides et entraînées au fond ou prises dans des cristaux de carbonate de calcium ou de phosphate. Ou peut-être ont-elles été dévorées par des prédateurs : larves de moustiques, larves d'Ephydra (mouche des marais salés), protozoaires tels l'amibe et les rotifères. Il n'y a rien d'autre à faire que de nettoyer le bassin et recommencer. Moins de filaments peut être le signe d'une récolte trop poussée : le poids journalier de la récolte doit être constant ou en augmentation.

Une culture de microorganismes en plein air est facilement envahie par d'autres microorganismes apportés soit par l'air, soit par l'eau ; Organismes fixés sur des poussières amenées par le vent, insectes, mains et pieds du personnel, excréments d'insectes ou d'oiseaux, etc. L'algoculteur doit toujours garder un œil sur les contaminants que sont les bactéries, les autres microalgues, les protozoaires et les larves d'insectes. D'où la nécessité d'avoir un petit laboratoire de contrôle.



P4. D'un simple laboratoire à Toliara (à gauche) à l'équipement de Earthrise Farm en Californie (ci-dessus), les moyens technologiques font toute la différence !

IV.4/ LES SYSTEMES DE CULTURE :

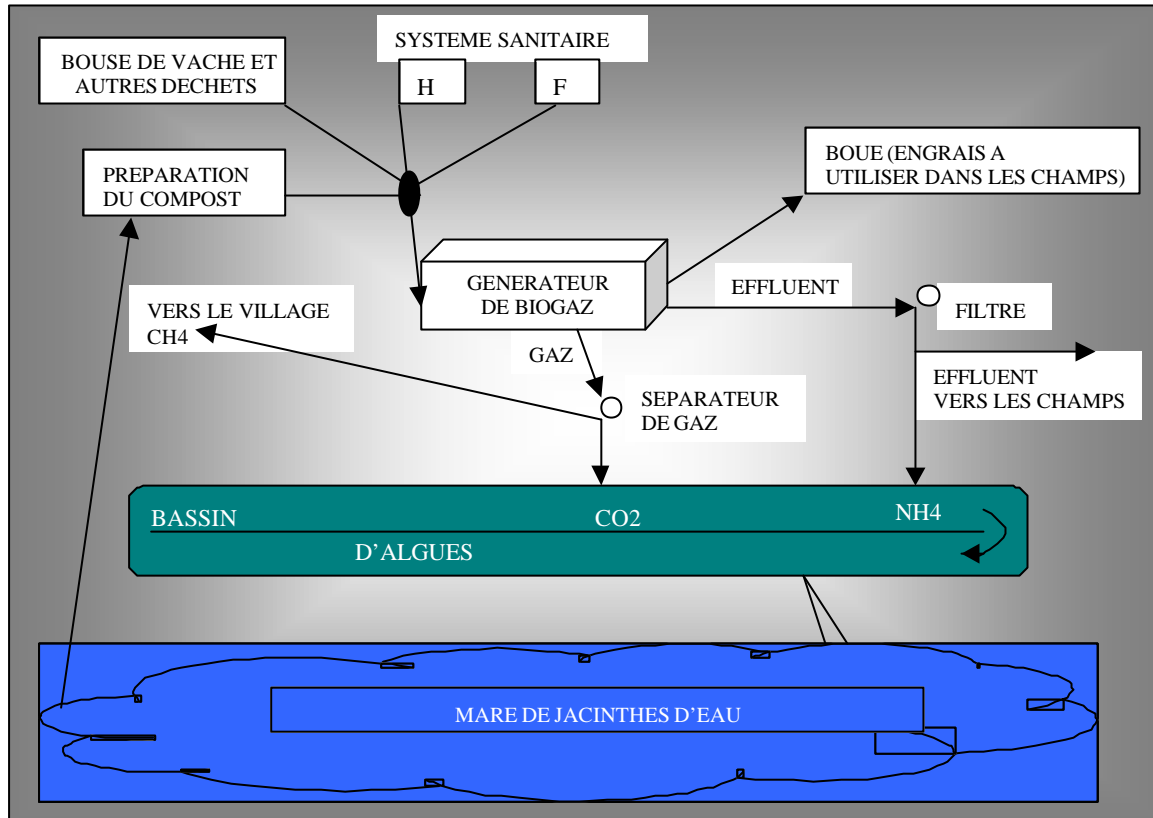
En tenant compte des quelques notions simples détaillées plus haut, on dispose de plusieurs manières de cultiver la spiruline.

IV.4.1/ Les systèmes artisanaux :

Selon les pays, les matériaux de construction diffèrent. Des palmes utilisées en Inde et au Zaïre contre un ensoleillement trop intense, au film transparent protégeant le bassin du sable au Chili, le principe en est simple : bassin imperméabilisé, recouvert de préférence, dans lequel on contrôle les paramètres physico-chimiques, avec un apport de carbone suffisant ; l'objectif étant de produire le maximum au moindre coût. La réussite d'un système de production de spiruline requiert la disponibilité de souches améliorées et d'un développement approprié de la biotechnologie de production de biomasse.

Le système intégré repose sur la participation directe de l'homme dans le cycle de la spiruline. Il fait appel à la biométhanisation des déchets. Les fermes appliquant ce système profitent d'un faible coût d'investissement et permettent la valorisation de plusieurs produits : colorants, vitamines, sels minéraux, protéine, et l'alimentation des bassins de poissons et crevettes en phytoplancton.

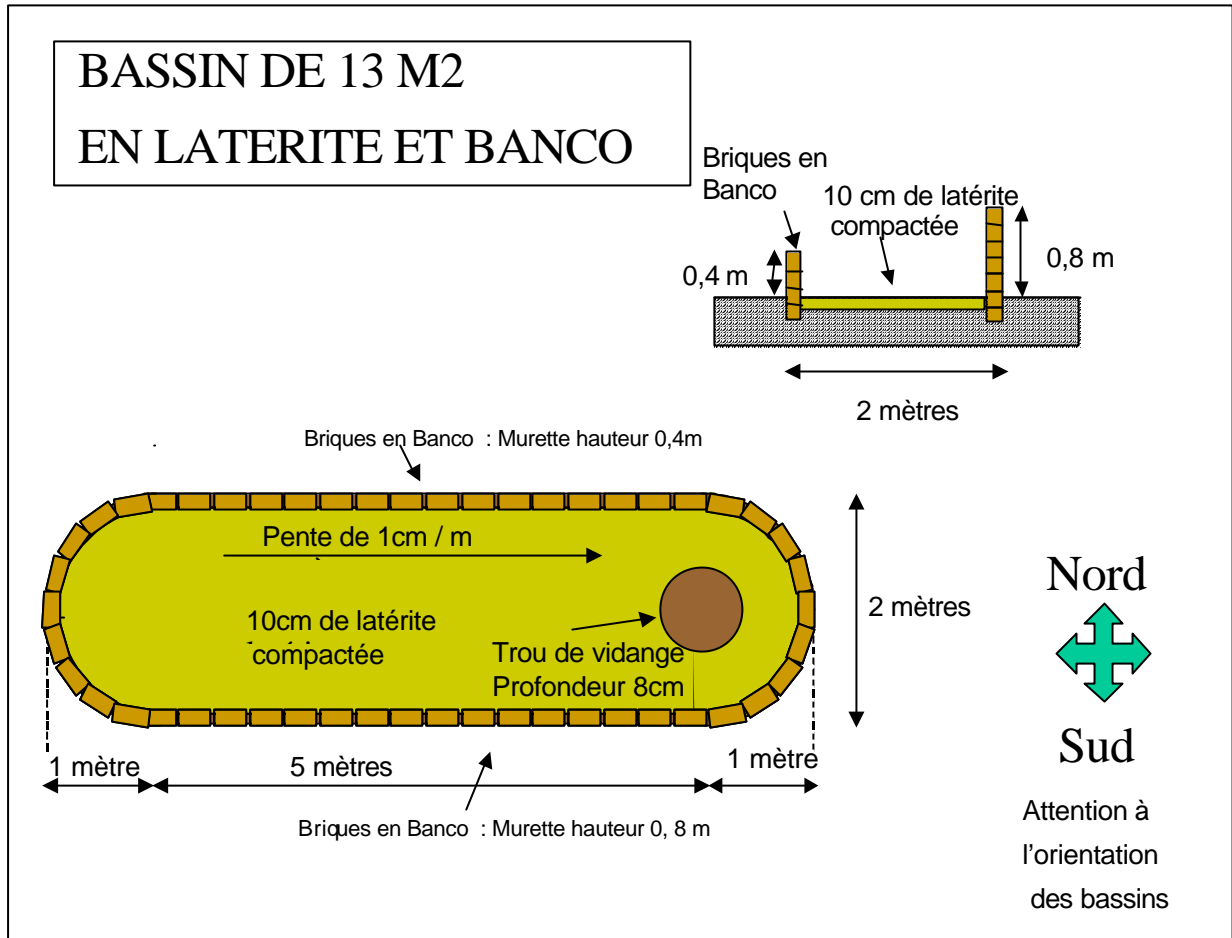
D2. Principe du système intégré :



Ce schéma peut être adapté à la disponibilité des matières premières et aux habitudes et tabous culturels de chaque pays. A Madagascar par exemple, dans la région de Toliara, comme le recyclage des déchets humains pose des problèmes d'ordre culturel, ceux-ci sont remplacés par la fiente de volailles (Ravelo, 2001). Les pays d'Asie orientale sont sans doute les moins réticents sur le principe du système intégré. Quelques projets basés dessus ont échoué faute d'intégration. On peut citer le cas du Sénégal et du Togo. Par contre, en Inde, au Vietnam et en Chine, ce système fut une réussite. Il est important de signaler ici que les améliorations continues apportées aux techniques de production de spiruline reviennent en grande partie aux projets de lutte contre la malnutrition que nous verrons plus loin.

Pour de petits bassins de moins de 500m², on peut utiliser plusieurs méthodes. Les bassins en dur sont faits avec du béton renforcé, du ciment, des pierres cimentées, des parpaings, des briques, etc. Ce sont les plus durables et les plus faciles à nettoyer, mais aussi les plus chers. Sinon on peut aussi couvrir un sol nivelé avec un film plastique. 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. Les films plastiques sont les plus commodes.

P5. Plan d'un bassin de spiruline proposé par le projet nigérien Agharous (Sales et Ancel, 2002)



Le système de bassin respirant repose sur un renouvellement constant de l'air au niveau de l'interface eau-air, pour éviter l'épuisement en dioxyde de carbone. Un vent artificiel est créé en recouvrant les bassins avec un tunnel en plastique ou en verre avec une entrée d'air à l'extrémité. A l'autre, une serre munie d'une haute cheminée en tissu, démontable. Ceci crée un courant d'air constant, renouvelle le CO₂ à la surface de l'eau et, en même temps, le frottement de l'air remue l'eau.

Inconvénient majeur : il n'y a pas assez de gaz carbonique dissous dans l'eau pour une croissance optimale ; on a obtenu 6 à 14 grammes par m² et par jour d'algue séchée (Fox, 1999). La culture étant limitée par l'apport en carbone et l'agitation insuffisante pour une production élevée. Ce système n'est plus utilisé.

IV.4.2/ Les photobioréacteurs :

Un photobioréacteur est constitué d'un système de tubes en plastique transparent posé sur un plan incliné, long d'une dizaine de mètres et haut de 2m. A la base du plan, un réservoir en tôle peint en noir reçoit l'eau du tuyau de retour. Le soleil chauffe l'eau de ce réservoir. L'eau chaude, par convection, remonte dans les tubes transparents. Puis elle atteint un réservoir plat en tôle peinte à l'aluminium, placé en haut. Le refroidissement commence là. L'eau en ressort par des tubes formant des serpentins dans un échangeur. Recueillie par un tube transversal, l'eau retourne par le tuyau et boucle le cycle.

Le photobioréacteur est surtout utilisé pour la production de biomasse très pure, pour en extraire des molécules de haute valeur. Il ne convient pas à la culture de masse.

Les tubes, les bioréacteurs et les micro-fermes sont employés dans les pays tempérés ou froids, où cette microalgue ne peut pas croître naturellement. Ce sont des systèmes très chers, et seuls les photobioréacteurs tiennent la route économiquement.

P6. Exemples de photobioréacteur



IV.4.3/ Les fermes industrielles :

La plus grande ferme industrielle se trouve aux Etats-Unis, en Californie ; c'est Earthrise Farm, qui couvre une superficie de 108 acres et approvisionne 40 pays en spiruline et produits dérivés. En 1996, sa production est estimée à 500 tonnes de poudre sèche.

La société Sosa Texcoco du Mexique ne fait pas de culture, elle récolte et transforme tout simplement. Elle est cependant le plus grand producteur mondial en comparant les productions cumulées de différents pays depuis 1975 (Henrikson, 1999).

Les systèmes avancés de bassins requièrent d'énormes superficies, jusqu'à 5000m² pour une profondeur usuelle de 15 à 25cm. Ils nécessitent aussi plus d'investissement, mais produisent en conséquence de la spiruline de très bonne qualité. Parmi les pays qui utilisent ce système, on peut citer la Thaïlande, Hawaï, Taïwan, Israël (désert du Neguev), la Chine, l'Inde, le Vietnam et le Chili (Atacama desert) et à moindre échelle le Bangladesh, Cuba, la Martinique, le Pérou, le Brésil, l'Espagne et l'Australie. La production de la spiruline est de fait internationale, contrairement à ce que l'on pourrait croire.

V) APPROCHE ECONOMIQUE DE LA PRODUCTION :

Vers les années 80, les sections les plus onéreuses dans la production de microalgue étaient la production de CO₂ à partir de carburant, la récolte et l'étape de séchage, qui ensemble contribuaient à 2/3 du coût de revient.

Environ 50% de la biomasse algale est fait de carbone. Or, cette quantité de carbone devait être fournie sous forme de gaz carbonique, en négligeant l'apport atmosphérique et l'apport organique du milieu. L'utilisation du CO₂ commercial coûtait plus cher que la construction d'une fabrique individuelle. De plus, à l'époque il n'existait pas vraiment de système de récolte satisfaisant au moindre coût (Venkataraman & Becker, 1985).

Depuis, les techniques d'approvisionnement en carbone des bassins d'algues se sont considérablement améliorées notamment depuis qu'on sait utiliser le sucre en remplacement (Jourdan, 1998).

V.1/ L'EVOLUTION DU PRIX DE LA SPIRULINE SECHEE:

Le coût de la spiruline a toujours été des plus variés, depuis même ses premières productions industrielles. En fait, chaque producteur imposait son prix sur le marché selon la qualité de son produit. Il est important de faire la distinction entre coût de production et prix de vente, car si la spiruline était produite à seulement 5\$ le Kg en Extrême-Orient en 1985, le kg s'y vendait déjà à 100\$ alors que Sosa Texcoco le vendait à la même époque à quelques 5\$! (Venkataraman & Becker, 1985).

Et maintenant encore, c'est un produit à haute valeur ajoutée dans les pays occidentaux, notamment lorsqu'elle est vendue en pharmacie.

Revenons maintenant à une époque plus récente. En 1996, elle a un coût moyen de 25\$ le kg, et on arrive enfin à faire le point sur les raisons de la divergence des prix (Jourdan, 1997): il varie considérablement selon le lieu de production, la quantité, la qualité, l'emballage et la conjoncture, auxquels il faudrait ajouter la technique de production. Ainsi, en 1998, 200kg de spiruline d'Extrême-Orient coûtent 10\$ le kg, tandis que le prix international par tonne se situe alors autour de 15 à 20\$ le kg. Le prix du détail tourne autour de 80\$ le kg, mais en pharmacie sous forme de gélules, la spiruline se vend en moyenne à 300\$ le kg !

V.2/ LE CAS DE MADAGASCAR :

En 2001, une étude comparée entre système intégré aquaculture/aviculture et des systèmes familiaux fut proposée à l'Institut Halieutique et des Sciences Marines de Toliara. Une analyse brute du projet donne les résultats ci-contre (Ravelo, 2001).

T5. Coûts d'investissement et de fonctionnement annuel du système intégré
(conversion sur la base de **1euro = 5800 francs malgaches**)

DESIGNATION	MONTANT (€)
Bassin réservoir de 3m3	258.62
Bassin de culture (20*10m2)	1496.55
Tuyauterie PVC	155.17
Pompes d'aquarium (*2)	172.41
Roues à aubes	431.03
Puits	431.03
Source d'énergie	2758.62
Serre	1758.62
Récolte	3103.45
Essorage	86.21
Extrudeuse	172.41
Séchoir solaire	191.38
Broyeur électrique	86.21
Emballage	301.72
Produits chimiques pour une année	215.52
Petit labo de contrôle et matériels	1941.38
Accessoires	209.31
Ferme (aviculture)	3931.03
Maraîchage	258.62
Biogaz	1379.31
Salaire	2482.76
Imprévus (10%)	2182.14
TOTAL	24003.50

T6. Coûts d'investissement et de fonctionnement d'une exploitation familiale (1^{ère} année)

DESIGNATION	BASSIN DE 24M ² (€)	BASSIN DE 48M ² (€)
Construction de bassins	232.76	435.34
Film plastique noir	331.03	662.07
Toit translucide	206.90	413.79
Toile moustiquaire	206.90	413.79
Produits chimiques (1an)	517.24	1034.48
Récolte	500	966.81
Extrudeuse	43.10	86.21
Séchoir solaire	191.38	191.38
Broyeur	43.10	86.21
Petit labo de contrôle	431.03	431.03
Petits matériels	93.10	129.31
Eau et électricité	344.83	689.66
Salaire	310.34	310.34
Imprévus (10%)	345.17	585.04
TOTAL	3796.88	6435.46

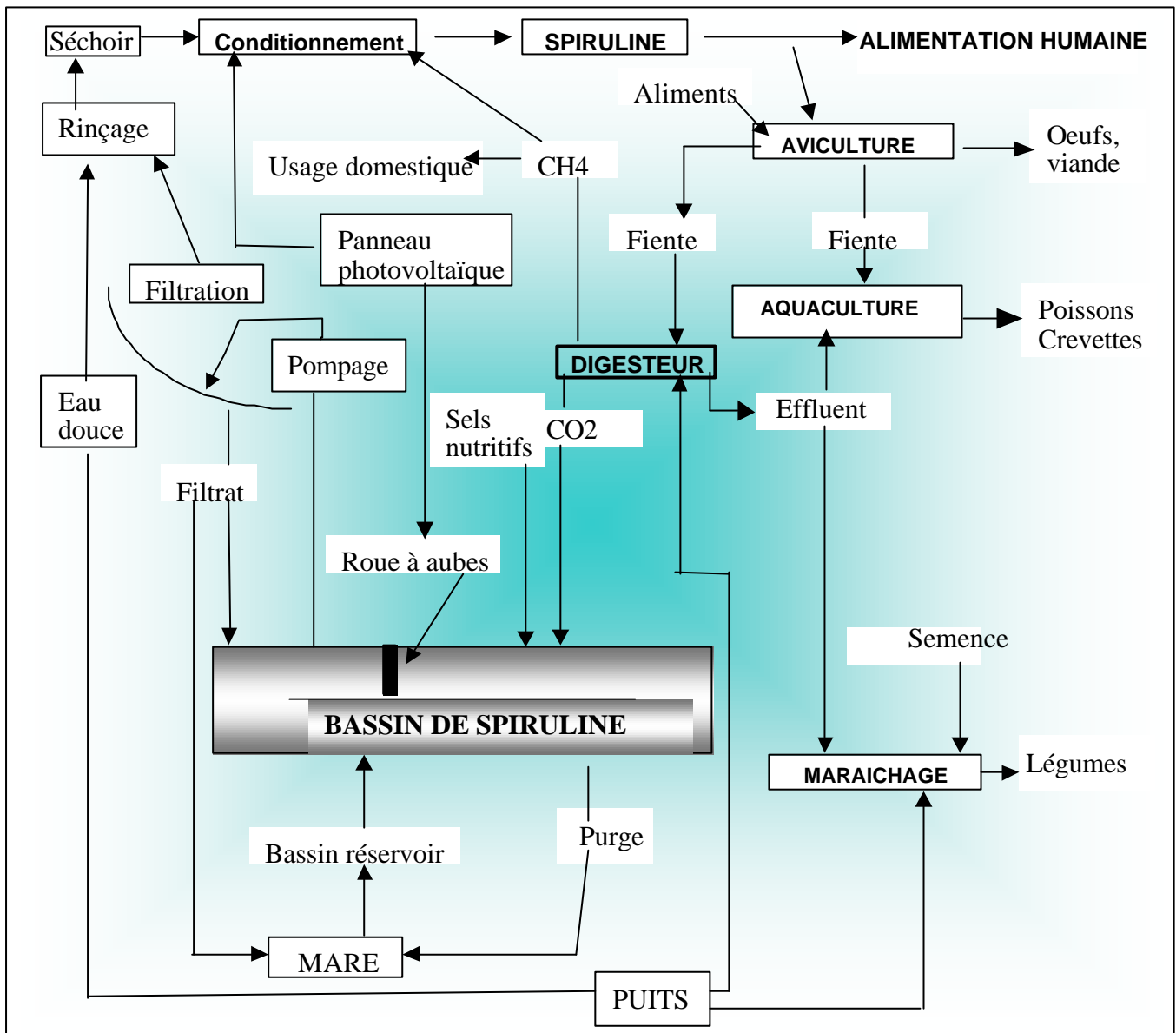
T7. Production prévue selon la taille des bassins

	24m ²	48m ²	200m ²
Production journalière estimée	240g	480g	2Kg
Production moyenne annuelle (300j)	72Kg	144Kg	600Kg

T8. Bilan estimatif (prix de vente de la spiruline : **25.86€ le kg** ; tous les montants sont en euros)

	Bassin de 24m ²	Bassin de 48m ²	Système intégré de 200m ²
Investissement+	3796.88	6435.46	24003.50
Fonctionnement			
Production annuelle	72 Kg	144 Kg	600 Kg
Recettes annuelles	1861.92	3723.84	15516.00
Situation 1^{ère} année	- 1934.96	- 2711.62	- 8487.50
2 ^{ème} année			
Charges	1034.48	1379.31	2586.21
Situation 2	- 1107.52	- 367.09	+ 4442.29
3 ^{ème} année			
Charges	1034.48	1379.31	2586.21
Situation 3	- 280.08	+ 1977.44	+ 17372.08
4 ^{ème} année			
Charges	1034.48	1379.31	2586.21
Situation 4	+ 547.36	+ 4321.97	+ 30301.87

D3. Schéma du système intégré proposé à Toliara



Si on excepte le bénéfice provenant des fermes (aviculture et autres aquacultures) et les produits de maraîchage, l'exploitation en système intégré sera autonome dès la 3^{ème} année et les bassins artificiels, de 24m² et de 48m², dès la 6^{ème} année et la 4^{ème} année respectivement (Ravelo, 2001).

La rentabilité d'une station de culture de spiruline dépend donc de la taille des bassins. Plus la station est grande, plus il y aura de production, plus vite le coût d'installation sera amorti.

Au vu de ces informations, comment envisager le développement de la culture de spiruline à Madagascar dans les prochaines années ? A Toliara, 300Ha de terrain répondent d'ores et déjà aux conditions de culture de spiruline dont 50Ha ne réclamant aucun aménagement particulier. Même les régions qui ne réunissent pas les conditions pour l'algoculture peuvent être aménagées pour développer la nouvelle filière. Une équipe de Taratra, une association pluridisciplinaire basée dans la capitale, mène des études pour implanter la culture de la spiruline dans la région des hautes terres, pauvre en sels minéraux. Ces sels indispensables qui y font défaut peuvent être recueillis dans le Sud (Ramarosaona, 1999).

A qui vendre dans ce cas? Selon un océanographe attaché au ministère malgache de la pêche, la spiruline produite sera en grande partie destinée à l'export moyennant une unité industrielle de traitement. Mais, les demandes émanent également des opérateurs locaux : une société de fabrication de provende a déjà émis le souhait d'investir près de 862 000 € dans l'algoculture. Cette activité serait créatrice de près de 5000 emplois (Ramarosaona, 1999).

L'algoculture a débuté récemment sur les côtes sud de Madagascar. Elle s'est ensuite étendue sur les côtes de Mahajanga, dans le nord-ouest du pays, à Nosy Be, et dans la région de Vohémar au nord-est.

VI) LES ACTEURS DU DEVELOPPEMENT DE LA CULTURE DE SPIRULINE DANS LES PVD :

Au-delà des considérations culturelles (voir chapitre IV – paragraphe IV.4.1), la production de spiruline est soumise à diverses difficultés de commercialisation dans le Tiers-Monde.

La première concerne l'exportation. En effet, comme tout autre produit agroalimentaire, la spiruline est soumise à des normes de qualité strictes, notamment sur les bactéries et les métaux lourds (voir Annexes). Ainsi, depuis 1982, la spiruline mexicaine de Sosa Texcoco subit par moment des embargos de la part des Etats-Unis pour des problèmes de métaux lourds (Henrikson, 1999).

Cette barrière de qualité limite énormément la concurrence face aux produits de haute qualité provenant des Etats-Unis ou de la Thaïlande par exemple. Toutefois, cela n'empêche pas sa commercialisation à l'intérieur même des pays producteurs. Et d'ailleurs, c'est ce qui devrait toujours se faire, vu le manque de protéines alimentaires dans la plupart de ces régions. Quelques organismes de développement et des associations militent en ce sens.

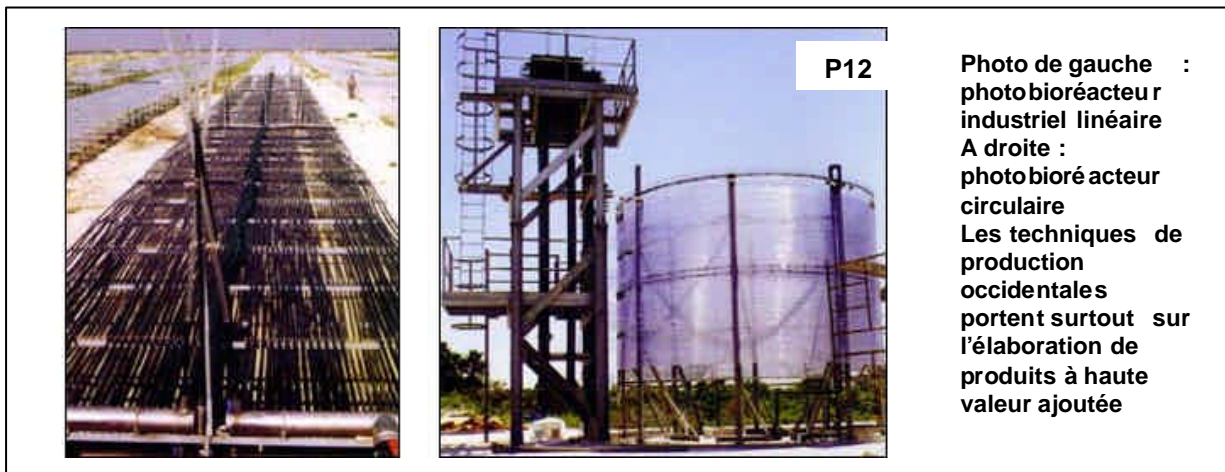
L'ACMA (Association pour Combattre la Malnutrition par l'Algoculture) est une association à but non lucratif créée en 1971, qui, comme son nom l'indique, a pour objectif de lutter contre la sous-alimentation dans les pays pauvres par la promotion de la spiruline. Elle travaille aussi bien avec les organisations locales que les agences gouvernementales, recherche le financement du projet de production de spiruline et agit comme consultant technique auprès des producteurs. Elle fut la première à effectuer des recherches sur les milieux de culture adaptés aux conditions rurales et participa pleinement à la réussite du système intégré en Inde (Fox, 1993).

« Intergovernmental Spirulina Program » est un organisme de création plus récente. Affilié à l'Institut Intergouvernemental pour la Coopération dans la Recherche Scientifique (CISRI) à Rome, son avantage revient au fait qu'il bénéficie du même titre que l'OMS dans les discussions internationales sur la question de la malnutrition.

Antenna Technologie est une association à but non lucratif créée en 1989, pour contribuer à rendre accessibles aux populations les plus pauvres des technologies adaptées leur permettant de couvrir leurs besoins de base en nourriture, santé et logement. L'un de ses domaines d'activité, à l'image de l'ACMA, est la production de spiruline à petite échelle en photobioréacteur en milieu urbain ou sa production en bassins villageois, sur lesquelles se poursuit un programme de recherche/développement pluriannuel. Son siège social se trouve à Genève.

Mais, malgré la contribution essentielle de ces organismes sur le développement de la culture de spiruline dans le Tiers-Monde, aucun projet ne saurait réussir sans la prise d'habitude des consommateurs. En effet, la spiruline est un nouveau produit à faire connaître. Quelques pays comme l'Inde, la Chine et le Vietnam ont immédiatement compris son intérêt pour l'alimentation humaine, tandis qu'un travail de sensibilisation et de marketing reste à faire dans plusieurs pays d'Afrique.

VII) LA SPIRULINE, FORCE OU REVE ?



Les progrès faits sur les techniques de culture de spiruline ne cessent de s'élargir. A l'image de l'unité de production industrielle de spiruline installée depuis 1997 dans le sud de l'Espagne (Jimenez & al., 1999), l'Europe est pleinement dans la course, même si encore peu d'européens en consomment régulièrement.

De récentes recherches sur les photobioréacteurs ont montré la possibilité de faire pousser l'algue dans l'espace sous microgravité avec des fibres optiques (Borowitzka, 1999), de quoi nourrir d'espoir l'astronautique moderne. Une autre utilisation de la spiruline qui n'est pas traitée dans ce rapport concerne le traitement des effluents, car, dans ce domaine, il existe d'autres espèces microalgales beaucoup plus efficaces qu'elle, telle la chlorelle.

Les expériences génétiques effectuées sur la spiruline visent principalement son adaptation à d'autres milieux de culture moins contraignants, surtout à l'eau de mer. Les souches de spiruline ne sont pas toutes répertoriées dans la base de données génétique universelle Gene Bank. Les manipulations génétiques sont plus complexes à réaliser par rapport aux cyanobactéries fixatrices d'azote, à cause du caractère particulier du sphéroplaste et des trichomes de la spiruline, et de l'absence de plasmide dans ses cellules (Venkataraman, 1998).

Un projet gigantesque mais dont la réalisation reste à faire, c'est bien sûr le rêve de nourrir tous les enfants mal nourris du monde entier. Il a été calculé que, pour nourrir 30 millions d'enfants avec 10g de spiruline par jour, il faut une production annuelle de 109 500T de spiruline sèche, moyennant une surface totale d'au moins 3000 Ha ! L'idée est de construire des fermes géantes alimentées en eau de mer, en recyclant les déchets carbonatés industriels et en utilisant essentiellement les énergies vertes pour leur fonctionnement (Fox, 1999). Dans l'état actuel des connaissances, la productivité en eau de

mer est encore trop faible pour envisager des productions importantes. Cette question reste problématique.

En aquaculture, bien qu'elles existent, ses applications sont tout de même limitées à des finalités spécifiques (coloration et complémentation alimentaire essentiellement), étant donné que d'autres microalgues, comme la populaire *Isochrysis galbana* coûtent moins cher pour les besoins aquacoles courants. Et même, la concurrence est rude entre cyanobactéries car on a découvert assez récemment que *Haematococcus pluvialis* fournit une meilleure astaxanthine qui peut être utilisée comme colorant naturel en salmoniculture (Weissman & Benemann, 1999)

Que nous faut-il retenir de tout cela ?

CONCLUSION :

En 1999, la production mondiale de spiruline est de 2450T, contre les 3760T escomptés des analyses prévisionnelles américaines faites en 1993, soit 1310T de moins. Quel est l'origine d'un si grand écart ? Premièrement, les Etats-Unis ont produit beaucoup moins qu'espéré depuis 1998. C'est aussi le cas du Mexique, de la Chine et de l'Inde qui sont pourtant de gros producteurs potentiels. A l'inverse, contre toute attente, les petits producteurs que sont la Birmanie et Taïwan ont eu des productions respectivement de 230% et de 25% supérieures aux moyennes prévues. La Birmanie a commencé à produire seulement à partir de 1991.

Ceci nous amène à cette hypothèse logique que les pays en voie de développement pourraient bien prendre la relève dans la production de spiruline, grâce aux micro-projets et au concours des organismes partenaires. Le marché est loin d'être saturé, à condition que le produit soit bien accepté par la population. De plus en plus de personnes de tous pays désirent s'investir dans la production à petite échelle qui ne nécessite pas d'investissement énorme, contrairement à toute autre activité aquacole, et leur permet d'aider les populations démunies sans pour autant se ruiner ; la spiruline s'inscrit aussi dans ce contexte social.

Parallèlement, les recherches thérapeutiques impliquant la spiruline continuent leur avancée dans les pays occidentaux, notamment dans le domaine de l'immunologie contre les infections sexuellement transmissibles. Malheureusement, la spiruline vendue en pharmacie coûte cher, et encore bien peu de gens connaissent les vertus nutritionnelles de ce produit. Ces mêmes vertus qui lui vaudront sans doute une percée dans l'astronautique des années à venir.

A l'heure où un déséquilibre à l'échelle planétaire de l'alimentation et de la santé humaine s'avère pour le moins inquiétant, les multiples ressources de cette cyanobactérie si singulière nous révèlent l'aquaculture sous un nouveau jour.

LISTE DES REFERENCES

ANUSUYA D.M. et VENKATARAMAN L.V., 1983

« Supplementary value of the proteins of the blue-green algae *Spirulina platensis* to rice and wheat proteins. »

Nutr. Rep. Internat., N°28. P1029-1035

BABU M. et son équipe, 1995

« Evaluation of chemoprevention of oral cancer with spirulina. »

Nutrition and Cancer Vol. 24, N°2. P197-202

BOROWITZKA M.A., 1999

« Evolution of closed photobioreactors. »

8th International Conference on Applied Algology (8th ICAA), 26 september – 1 october 1999 ; Abstracts. Consiglio Nazionale delle Ricerche, Italy. P148

BUJARD E., BRACO U., MAURON J., MOTTU F., NABHOLZ A., WUHRMANN J.J et CLEMENT G., 1970

« Composition and nutritive value of blue-green algae (*spirulina*) and their possible use in food formulations. »

3rd International Congress of Food Science and Technology, Abstracts. Washington

CAPET F., DEBAILLIE R., TAFFOREAU J. et VAN OYEN H., 1999.

« Définitions et symptômes du diabète. »

Diabète : situation actuelle et éléments pour le développement d'une politique de santé ; Centre de Recherche Opérationnelle en Santé Publique – Episérie N°19 ; P8-12

CLEMENT G., 1975

« Production et constituants caractéristiques des algues *Spirulina platensis* et *S. maxima* »

Ann. Nutr. Aliment. N°29, P477-487

FALQUET J., 1996.

Spiruline : aspects nutritionnels

Version papier : 22P. Disponible sur le site <http://www.antenna.ch/aspectsNutri.htm> . Consulté le 29 avril 2002

FARRAR W.V., 1966

« Techuitlatl, A Glimpse of Aztec Food Technology »

Nature N° 5047, 23 juillet

FEDKOVIK Y., ASTRE C., PINGUET F., GERBER M., YCHOU M. et PUJOL H., 1993

« Spiruline et cancer »

Spiruline, algue de vie ; bulletin de l'Institut Océanographique de Monaco N° spécial 12 – Monaco, Musée océanographique. P117-119

FOX R.D., 1993.

« Construction of village scale system integrating spirulina production with sanitation and development. »

Spiruline, algue de vie ; bulletin de l'Institut Océanographique de Monaco N° spécial 12 – Monaco, Musée océanographique. P195-201

FOX R.D., 1999

La spiruline : technique, pratique et promesse

Edisud. 246P. ISBN 2-7449-0100-8

HAYASHI T. et HAYASHI K. et al., 1996

« Calcium spirulan, an inhibitor of enveloped virus replication, from a blue-green alga Spirulina. »

Journal of Natural Products, Vol.59, N°1. P83-87

HENRIKSON R., 1997

Earth Food Spirulina (Ronore Enterprises, Inc.)

Disponible sur le site <http://spirulinasource.com> . Remis à jour le 15 novembre 1999

HENSON R., 1993

« Spirulina : Health food for the aquarium »

Freshwater and Marine Aquarium, P70-72

JIMENEZ C., LABELLA D., RIVERO B., BROUERS M. et NIELL F.X., 1999

« Viability of an industrial unit for the production of Spirulina in Southern Spain »

8th International Conference on Applied Algology (8th ICAA), 26 september – 1 october 1999 ;

Abstracts. Consiglio Nazionale delle Ricerche, Italy. P134

JOHNSON P. et SHUBERT E., 1986

« Availability of iron to rats from spirulina, a blue-green algae »

Nutrition Research N°6, P85-94

JOURDAN J.P., 1997

Cultivez votre spiruline, manuel de culture artisanale de la spiruline.

Le Castanet, 30140 Mialet. 126P

Disponible sur le site <http://www.antenna.ch/publications.htm> . Remis à jour le 08 juin 2002

JOURDAN J.P., 1998

« Sugar as a source of carbon for spirulina (*Arthrospira platensis*) culture »

Cyanobacterial biotechnology : proceedings of the International Symposium, september 18-21 1996.
Oxford & IBH Publishing CO.PVT.LTD. P277-280

LINDBLAD P., OXELFELT F., TAMAGNINI P. et TROSHINA O., 1998

« Cyanobacterial Biotechnology Nostoc PCC 73102 and H₂: Knowledge, Research and Biotechnological Challenges »

Cyanobacterial biotechnology : proceedings of the International Symposium, september 18-21 1996.
Oxford & IBH Publishing CO.PVT.LTD. P11-13

MANI U.V., SANGEETA S., IYER U.M. and SUBRAMANIAN S.R. « Studies on the effect of spirulina supplementation in Control of Diabetes Mellitus »

Cyanobacterial biotechnology : proceedings of the International Symposium, september 18-21 1996.
Oxford & IBH Publishing CO.PVT.LTD. P301-304

PEREZ R., 1997

Ces algues qui nous entourent : conception actuelle, rôle dans la biosphère, utilisations, culture.
Editions IFREMER. P16-23

QUILLET M., 1975

« Recherches sur les substances glucidiques élaborées par les spirulines »

Ann. Nutr. Aliment. N°29. P553-561

RAMAROSAONA J., 1999

Madagascar : la culture des algues se développe sur les côtes malgaches. Inter Press Service ;
Consulté le 21 février 2002 sur le site <http://www.link.no/IPS>

RAVELO V., 2001.

« Bio-écologie, valorisation du gisement naturel de spiruline de Belalanda (Toliara, sud-ouest de Madagascar) et technologie de la culture »

Thèse de doctorat de 3^{ème} cycle en océanologie appliquée – Institut Halieutique et des Sciences Marines, Université de Toliara. P132-142

RICHMOND A., 1986

Handbook of microalgal mass culture ; CRC Press. P212-213

SALES S. et ANCEL P., 2002.

Projet spiruline Agharous (disponible en diapositives)

SESHADRI C.V., 1993.

Large scale nutritional supplementation with spirulina alga : report from Shri AMM Murugappa Chettiar Research Center (MCRC) to All India Coordinated Project on Spirulina Alga of the Department of Biotechnology, Ministry of Science and Technology, New Delhi, India

SIRONVAL C., 1993

« La spiruline, une arme contre la malnutrition, histoire et perspectives »

Spiruline, algue de vie ; bulletin de l'Institut Océanographique de Monaco N° spécial 12 – Monaco, Musée océanographique. P203-210

VENKATARAMAN L.V. et BECKER E.W., 1985.

« Algal production costs »

Biotechnology and Utilization of Algae : the Indian Experience – Sharada Press. P208-212

VENKATARAMAN L.V., 1998.

« Spirulina by 2001AD »

Cyanobacterial biotechnology : proceedings of the International Symposium september 18-21 1996. Oxford & IBH Publishing CO.PVT.LTD., P267-273

WEISSMAN J.C. et BENEMANN J.R., 1999

« Microalgal applications in aquaculture »

8th International Conference on Applied Algology (8th ICAA), 26 september – 1 october 1999 ; Abstracts. Consiglio Nazionale delle Ricerche, Italy. P282