

La spiruline, intérêt nutritionnel, culture expérimentale et modélisation

Problématiques :

- La production d'aliments végétaux et/ou d'origine animale nécessite la mobilisation de terres fertiles et l'utilisation d'eau (irrigation), d'engrais, et de produits phytosanitaires. Dans certains pays en voie de développement la surface en terres arables et l'eau sont des ressources limitées. Certains aliments simples comme les protéines et les vitamines peuvent faire défaut car la production de viande a une efficacité énergétique faible et un coût financier élevé.
- Peut-on produire des aliments sur n'importe quel sol, avec un apport d'intrants limité mais qui soient qualitativement adaptés aux besoins humains ?

Objectifs :

Notions et contenus	Compétences exigibles
La production végétale : utilisation de la productivité primaire	
<p>Un agrosystème implique des flux de matière (dont l'eau) et d'énergie qui conditionnent sa productivité et son impact environnemental.</p> <p>L'exportation de biomasse, la fertilité des sols, la recherche de rendements posent le problème de l'apport d'intrants dans les cultures (engrais, produits phytosanitaires, etc.).</p> <p>Le coût énergétique et les conséquences environnementales posent le problème des pratiques utilisées. Le choix des techniques culturales vise à concilier la nécessaire production et la gestion durable de l'environnement.</p>	<p>Étudier un exemple de culture végétale pour montrer comment des techniques variées permettent une production quantitativement et qualitativement adaptée aux besoins.</p> <p>Faire preuve d'esprit critique en étudiant la conduite d'une culture quant à son impact sur l'environnement.</p> <p>Recenser, extraire et exploiter des informations, notamment sur le terrain, utiliser des bases de données et des logiciels pour comparer les bilans d'énergie et de matière (dont l'eau) d'un agrosystème de production végétale et d'un écosystème peu modifié par l'homme.</p> <p>Concevoir et réaliser un protocole pour mettre en œuvre une culture et analyser ses caractéristiques et/ou utiliser des logiciels modélisant une culture, ses bilans et sa gestion.</p>

Type d'activité : documentaire

Conditions de mise en œuvre :

- Document d'appel : Vidéo La spiruline ARTE Mai 2005, un reportage sur la spiruline et son utilisation par les Kanembous, une ethnie qui vit sur les rives du lac Tchad (www.portail-humanitaire.org/ressources/Spiruline.php)
- Montrer que la culture de spiruline pour l'alimentation humaine est justifiée par sa composition chimique. Voir **Des cas de malnutrition** et **Activité composition chimique de la spiruline**)

- À partir des données sur les exigences de la spiruline concevoir un protocole permettant la culture et la mesure de sa croissance (**voir : culture de la spiruline**).
- Comparer l'efficacité énergétique, le rendement protéique et les besoins en eau de la spiruline à ceux d'autres cultures (**voir : production de spiruline comparée à d'autres cultures**)

Documents et matériel à disposition :

- Des données (mesures de DO) sur la croissance de cultures de spiruline sont disponibles sur le site <http://svt.ac-versailles.fr>

Compétences pouvant être travaillées et / ou évaluées :

- Capacités pratiques
 - Observer le réel
 - Réaliser une préparation en vue de l'observation
 - Réaliser une expérience, une manipulation, une mesure
- Capacités de communication
 - Traduire des informations par un schéma
 - Représenter l'observation par un dessin
 - Présenter / traiter des données sous forme de tableau
- Attitudes
 - Sensibilisation à la santé, au développement durable, etc.

Des cas de malnutrition

Le Kwashiorkor

Le kwashiorkor fait partie des malnutritions et touche chaque année des millions d'enfants, principalement africains.

Cette pathologie résulte d'une alimentation hypoprotéique — n'apportant pas les quelque 50 grammes par jour recommandés — alors même que l'apport calorique global peut être suffisant.

Le kwashiorkor touche les enfants de deux ou trois ans, quelques mois après un sevrage brutal. Contrairement au lait maternel, riche en protéines, le régime adulte ne couvre plus les besoins en protéines de l'enfant.

En effet, dans les pays touchés, l'alimentation des jeunes enfants est principalement constituée de bouillie de céréales comme le manioc, le mil, le maïs ou le riz. Ces repas sont insuffisamment riches en protéines, en particulier comparé aux besoins importants de l'enfant à cet âge.

Le kwashiorkor n'est pas seulement dû au seul déficit protéique. On a aussi constaté une baisse des taux sanguins de magnésium, de potassium, de fer, de zinc, des vitamines.

En réalité, la maladie est due à une insuffisance de certains acides aminés dont la lysine, la méthionine et le tryptophane. Cette carence en acides aminés peut être traitée par une alimentation riche en produits laitiers. Malgré les traitements, le taux de mortalité des enfants atteints de formes avancées de la maladie reste important.

Le fer dans l'alimentation

Le fer est une substance nutritive vitale. Les aliments les plus riches en fer sont les viandes rouges ; on le trouve aussi dans les poissons gras, les abats de poulet et de dinde, certains types de noix ou de graines, les fruits secs, les légumes vert foncé et les céréales enrichies du petit déjeuner.

L'Organisation Mondiale de la Santé estime que 600 à 700 millions de personnes souffrent de carences en fer. Il s'agit probablement du problème nutritionnel le plus répandu dans le monde, et particulièrement dans les pays en voie de développement. Alors que dans certains de ces pays, la perte de

sang (due aux ankylostomoses¹) est souvent la cause de ce problème, en Europe occidentale, la carence en fer résulte d'un apport quotidien insuffisant dans notre alimentation

Les conséquences de ce faible apport en fer sont considérables. Le fer permet à l'hémoglobine (pigment rouge du sang) de fonctionner correctement en apportant de l'oxygène à toutes les cellules du corps. L'un des premiers signes d'une carence en fer est la fatigue. Les personnes qui mangent peu de viande, de volaille, de poissons courent le risque d'amenuiser leurs réserves en fer et ainsi, de présenter des symptômes de carence.

Composition chimique de la spiruline : comparaison des compositions chimiques de la spiruline, du maïs et du riz

Travail élève: à partir du tableau donné en annexe (composition-chimique-spiruline.xls), construire des graphiques permettant de mettre en évidence l'intérêt nutritionnel de la spiruline.

Composition de la spiruline, maïs et riz en % de MS (matière sèche) :

	Maïs	Spiruline	Riz paddy
Glucides	75	15	48
Protéines	8,9	60	9,2
Lipides	4	6	2,1

Teneur en différents acides aminés en mg/kg de MS (en gras les acides aminés essentiels) :

Acides aminés	Maïs	Spiruline	Riz
Isoleucine	337	3209	100
leucine	1155	4947	192
lysine	265	4,93	61,1
méthionine	197	1149	52
phénylalanine	463	2777	115
thréonine	354	2970	80
valine	477	3512	138
Arginine	470	4148	191
Tryptophane	67	929	30
Histidine	287	1085	53
Alanine	705	4515	127
Tyrosine	383	2584	65
Acide aspartique	655	5793	234
Cystéine	170	662	45
Acide glutamique	1768	8387	408
Glycine	386	3099	104
Proline	822	2382	140
Sérine	447	2998	106

Teneur en éléments minéraux de la spiruline, maïs et riz en mg/kg

¹ Les **ankylostomoses** sont des parasitoses intestinales provoquées par deux nématodes (petits vers ronds très voisins)

Éléments minéraux	Maïs	Spiruline	Riz
Fe	70	285	18
Calcium	50	1200	80
Phosphore	480	1180	370
Magnésium	150	1950	50
Manganèse	1	19	3

Bilan:

Sur le plan qualitatif, la spiruline est très riche en protéines et elle offre un éventail complet d'acides aminés dont de nombreux acides aminés essentiels, c'est-à-dire qui ne peuvent être synthétisés par l'organisme et doivent obligatoirement être amenés par l'alimentation. A ce titre, la spiruline peut se voir attribuer le statut d'aliment protéique complet. Cependant, comme dans la plupart des végétaux, certains aminoacides ne sont présents qu'en faible quantité : c'est le cas des acides aminés soufrés (Méthionine et Cystéine) et de la Lysine.

Il est alors intéressant d'envisager l'utilisation de la spiruline dans le cadre d'une complémentation protéique pour améliorer sa valeur biologique en l'associant par exemple à des céréales (mil, riz, millet...) et des oléagineux (poids, sésame...), respectivement riches en acides aminés soufrés et en Lysine.

Culture de la spiruline et quelques exploitations

Sources :

- Manuel de JP JOURDAN (www.antenna.ch/recherche/malnutrition/cultiver-spiruline)
- La spiruline pour tous –culture familiale par Gilles Planchon et V. Charito F. PILGRIM PUBLISHING

Quelques étapes

1. Se procurer une souche de spiruline à ensemercer². Des souches peuvent être commandées auprès de l'Institut Pasteur www.crbip.pasteur.fr/onglet.jsp?tab=cyano. Attention, il s'agit de commander des souches sous le nom scientifique de la spiruline (*Arthrospira platensis*).

Le milieu de culture : exemple de composition chimique d'un milieu initial pour cultiver les spirulines (d'après le manuel de G. PLANCHON) ; ce milieu convient pour des eaux de dureté nulle ou faible.

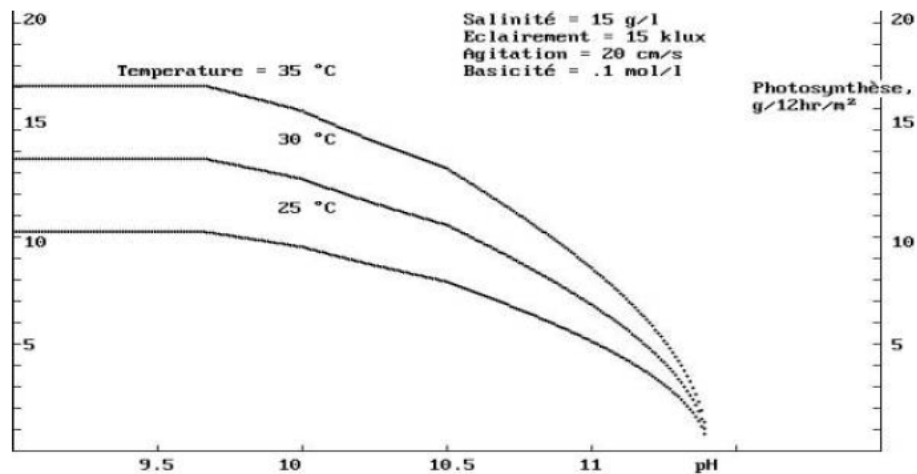
Nom de l'intrant	Formule chimique	g/L
Hydrogénocarbonate de sodium	NaHCO ₃	8
Chlorure de sodium	NaCl	5
Nitrate de potassium	KNO ₃	2
Sulfate de potassium	K ₂ SO ₄	1
Phosphate monoanionique	NH ₄ H ₂ PO ₄	0,2
Sulfate de magnésium	MgSO ₄ , 7H ₂ O	0,2
Urée	NH ₂ -CO-NH ₂	0,02
Chaux	Ca(OH) ₂	0,02
Sulfate de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

² Je remercie Gilles Planchon qui m'a très gentiment fourni une souche de spiruline d'origine indienne

2. Le démarrage de la culture se fait progressivement : Additionner un volume de milieu de culture équivalent au $\frac{1}{4}$ du volume de la suspension de spiruline initiale.

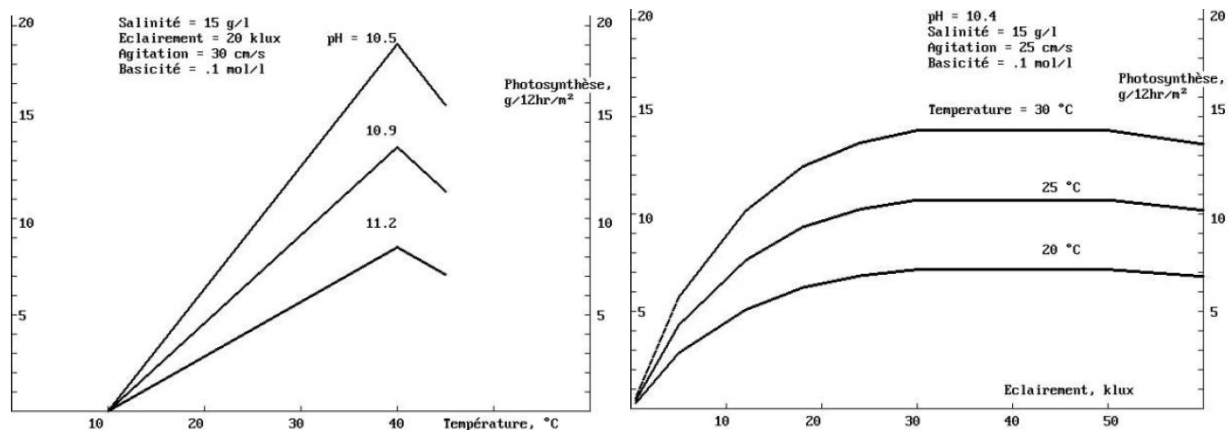
3. Conditions de culture : le milieu de culture doit avoir un pH compris entre 9,5 et 10,5

Activité photosynthétique en fonction du pH et de la température d'après la thèse de Zarrouk (1966) :



• **Placer la culture de Spiruline dans un milieu chaud** : l'optimum de croissance se situant entre 30°C et 40°C. Ces températures peuvent être obtenues en disposant par exemple les flacons de culture dans un bain-marie.

Activité photosynthétique en fonction de la température et de l'éclairement d'après la thèse de Zarrouk (1966)

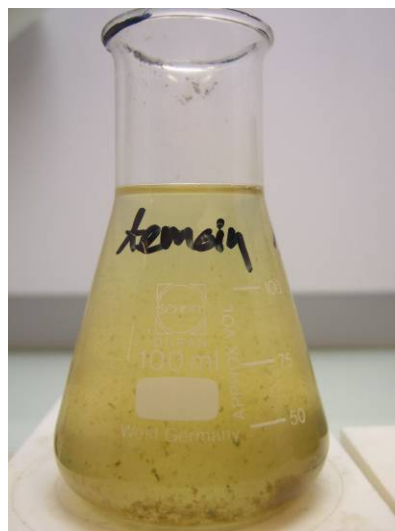
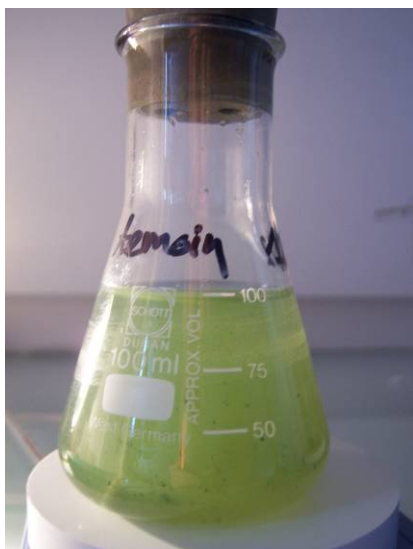


• Le milieu de culture doit être agité modérément (risque de casser les filaments de spiruline) à l'aide d'un bulleur à aquarium ou d'un agitateur magnétique.

Quelques erreurs à éviter :

1. Ne pas éclairer trop fortement la culture car il y a risque de photolyse. L'excès de lumière provoque alors une décoloration puis une destruction de la spiruline. La culture prend alors une teinte brun jaune kaki.

Voici le phénomène qui s'est produit en deux semaines quand j'ai décidé de remplacer le bain-marie par la chaleur émise par une lampe située à proximité de la culture.

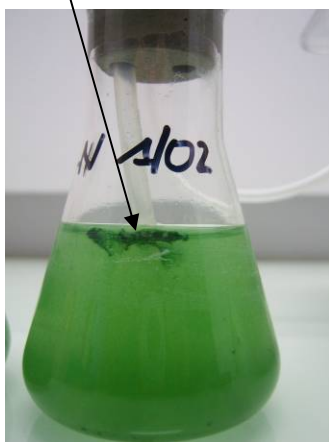


2. La carence en azote et production d'EPS

La spiruline sécrète un exo-polysaccharide sulfaté (EPS) qui forme comme une capsule à la surface externe des spirulines puis est peu à peu relâché dans le milieu de culture où il se dissout d'abord en le rendant plus « épais » et finit par former des peaux ou des grumeaux jaune-bruns de taille variable, microscopiques ou visibles à l'œil nu. Les grumeaux ou peaux d'EPS sont plus denses que le milieu de culture et peuvent se déposer au fond du bassin sous forme de boues.

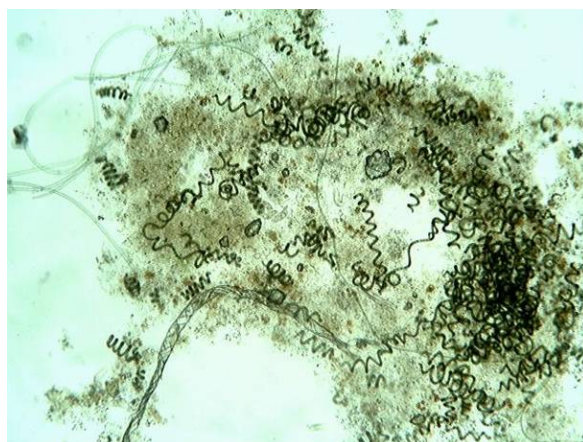
La carence en azote et des pH très élevés paraissent favoriser la formation d'EPS. Avec une souche spiralée, l'excès d'EPS entraîne parfois la floculation de spirulines avec formation de peaux ou grumeaux verts flottants.

Peaux ou grumeaux flottants verts



Formation d'amas de spirulines dans une culture carencée en N.

Excès d'EPS du à manque d'azote ammoniacal et/ou pH trop bas : ajouter de l'urée et/ou du carbonate de soude

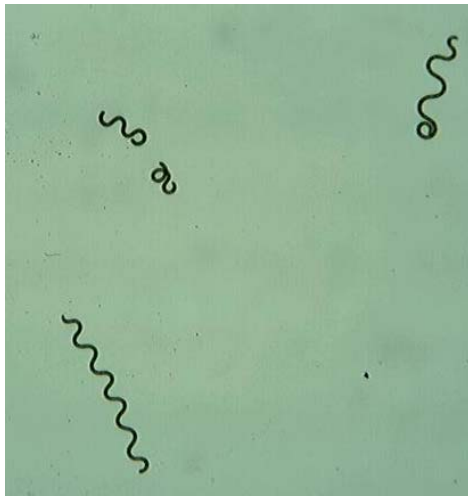


Spiruline en amas en raison d'un excès d'EPS (au mo X100)

Exploitation

1. Observation de la spiruline au microscope optique.

L'observation de la spiruline se fait facilement au microscope car elle a une taille moyenne de $250\mu\text{m}$.



Spiruline observée au mo X100



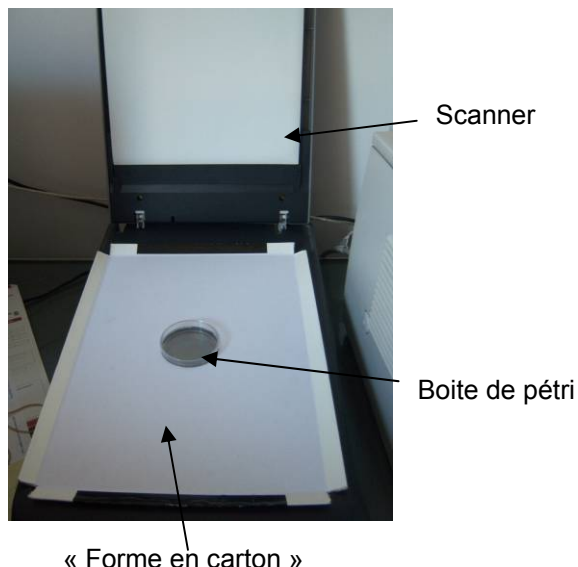
Spiruline observée au mo X400

2. Evaluation de la croissance de la spiruline.

La mesure de la croissance de la spiruline peut être réalisée par mesure de densité optique.

J'ai prélevé 10ml de la suspension (après homogénéisation) que j'ai versé dans une boîte de pétri. J'ai ensuite disposé la boîte sur la vitre du scanner à l'aide d'une forme qui me permettait de toujours la placer au même endroit (pour éviter les variations d'intensité lumineuse). L'image capturée à 600dpi est ensuite traitée avec Mesurim en réalisant des mesures de densité optique. Voir par exemple :

www.svt.acversailles.fr/archives/docpeda/actpeda/lycee/boite_outils/Classeur%20SVT/mesurim%20absorbance.html



Production de spiruline comparée à d'autres cultures

1. Pistes d'exploitation :

A l'aide des documents fournis :

- Comparer le rendement de la production de spiruline avec celui d'autres céréales. On considérera que la production de spiruline a lieu entre avril et octobre.
- Quels intérêts présente la culture de spiruline par rapport aux cultures traditionnelles.

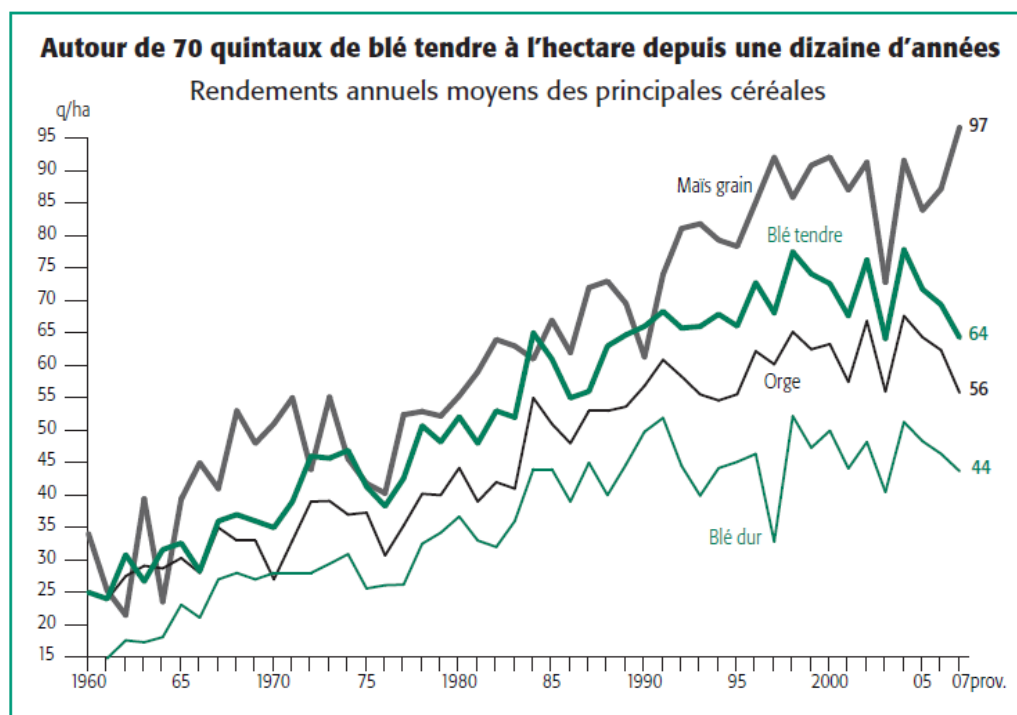
Production de spiruline :

La quantité de spiruline produite varie selon les saisons, la taille des bassins et l'amélioration de la pratique. Cette quantité varie de 90 kilos par an pour une surface moyenne de 60m² à 472 kilos par an pour 500 m², c'est-à-dire, avec une **productivité moyenne annuelle de 4g/m²/j**. (source colloque Tular page 90).

La productivité d'une culture intensive dépend fortement de l'agitation, sans que nous soyons encore en mesure de réellement quantifier cet effet. Plusieurs expérimentateurs rapportent des productivités records (jusqu'à 30, voire **40 ou 50 g/jour/m²** !) dans des conditions d'agitation excellentes, en général en petits bassins, en tubes ou au laboratoire. (d'après manuel de JP Jourdan page 40). Mais il est aussi possible d'augmenter la productivité par beau temps, de la faire passer par exemple à 12 ou 15, voire 20 g/jour/m², si l'agitation est suffisante, en injectant du **gaz carbonique pur** directement dans la culture pour baisser son pH à 10 ou moins.

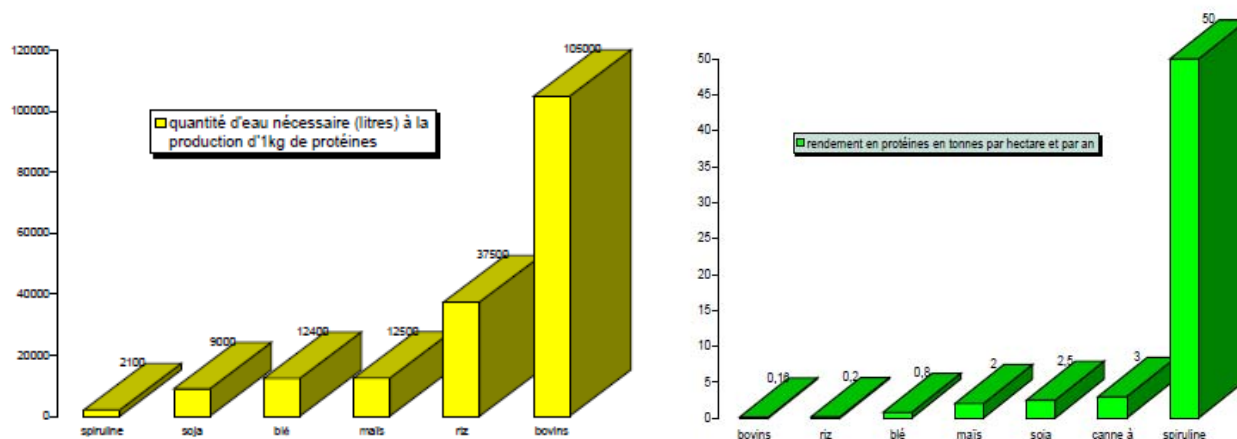
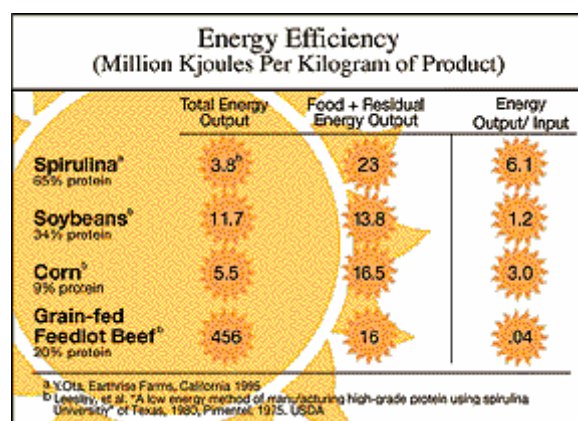
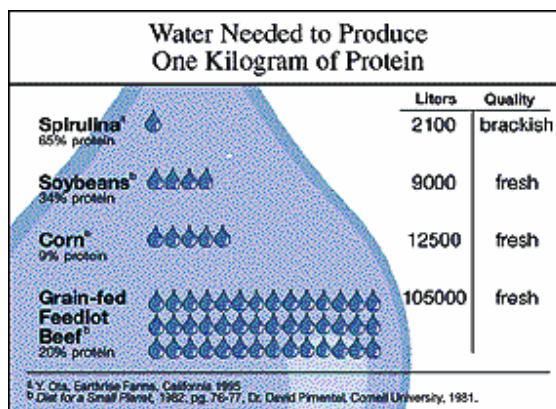
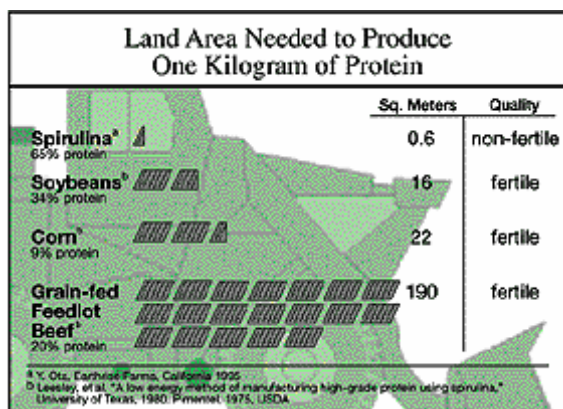
Cultures traditionnelles :

Dans le monde, les zones à haut rendement (supérieur à 50 q/ha) sont très limitées. Elles concernent principalement les Etats-Unis (où les rendements sont généralement plus élevés : 82 q/ha en 2002), et l'Europe avec notamment la France et l'Italie. Plus de 30 % des superficies de maïs grain sont localisées dans ces zones dont 28 millions d'hectares aux Etats-Unis et près de 14 millions d'hectares en Europe (comprise l'ex-URSS). Dans ces zones, le maïs est cultivé de façon intensive et il est destiné essentiellement à l'alimentation animale et aux industries de transformation.



Source : Agreste - Statistique agricole annuelle

Sources : www.spirulinasource.com/earthfoodch7b.html



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 d'après <http://spiruline.hautefort.com/list/documents/2012818299.pdf> la spiruline bilan et perspectives, thèse présentée et soutenue publiquement le : 13 mai 2008 par Hé-lène CRUCHOT.

La spiruline : généralités

Extraits de la thèse présentée et soutenue publiquement le : 13 mai 2008 par Hélène CRUCHOT « Spiruline bilan et perspectives ».

La spiruline est classée parmi les **cyanobactéries**. Ces bactéries sont autotrophes, c'est-à-dire capables d'utiliser l'énergie de la lumière pour la photosynthèse. Voir aussi classification phylogénétique du vivant de Lecointre et Le Guyader page 69.

Il existe à ce jour 200 genres et environ 1 500 espèces de cyanobactéries connues ; 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*. 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*).

Règne	Monera ou Bacteria
Sous-règne	Prokaryota
Phylum ou Division	Cyanophyta ou Cyanobacteria
Classe	Cyanophyceae
Ordre	Oscillatoriales
Famille	Oscillatoriaceae
Genre	<i>Arthrospira</i>
Espèce	<i>platensis</i>

2. 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 250µm lorsqu'il a 7 spires et son diamètre est d'environ 10µm. 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.

Descriptions de plusieurs variétés d'*Arthrospira platensis*, selon l'endroit où elles poussent naturellement

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

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*.

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. Ces deux espèces sont : *Arthrospira platensis*, initialement originaire du Kanem (Tchad) et *Arthrospira geitleri* ou *maxima*, originaire du Mexique.

- *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 350µm de long et entre 6 et 12,45µm de diamètre ; ils sont un peu rétrécis au niveau des articulations. Les tours de spire ont un diamètre de 20 à 50µm, diminuant légèrement vers les extrémités.



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

- *Spirulina maxima* se caractérise par des trichomes de 70 à 80µm de long, de 7 à 9µm de diamètre et légèrement effilés aux extrémités ; ils forment une spirale régulière de 3 à 8 tours et

de 40 à 60µm de diamètre. Les cellules constituant les trichomes mesurent entre 5 à 7µm de long et ne rétrécissent pas au niveau des articulations.



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

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

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

Le terme "spirales" 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.

Sachant que certaines souches initialement spirales 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 ?

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) .

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 :

- 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 :

- 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 énergétiques ;
- 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.

3. Croissance

Une des caractéristiques des cyanobactéries est qu'elles possèdent des thylakoides, siège de la photosynthèse. Malgré ce système photosynthétique proche de celui des eucaryotes car contenant de la chlorophylle-a et un photosystème II (PS-II), ce sont de vrais procaryotes. Le photosystème, ainsi que les pigments photosynthétiques, les pigments accessoires et les composants du transport d'électrons sont ainsi inclus dans des membranes thylakoides comportant des granules dites "phycobilisomes". L'association des granules protéiques à une partie pigmentaire donne les phycobiliprotéines. Ces granules contiennent en particulier un pigment essentiel au transport de l'énergie vers le PS-II, la phycocyanine. Cette protéine contient un groupement prosthétique de

type polypyrrole qui lui confère une magnifique couleur bleue ainsi qu'une fluorescence rouge exceptionnellement efficace. C'est de cette couleur bleue caractéristique que provient la dénomination d'algue bleue donnée à cet organisme. Les cyanobactéries assimilent le carbone à travers le cycle de Calvin et stockent énergie et carbone sous forme de glycogène. Bien que leurs schémas métaboliques varient considérablement, elles ont en commun l'absence de cycle de Krebs complet.

4. Écologie

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 :

- 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.

5. 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.

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".

6. 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 2µm 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.

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.

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.

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 ramer hors de la dangereuse spirale de ses compagnes qui flottent toutes en masse, dès le lever du jour.