

plein air (figure 5).



Figure 4 : Bassins contigus sous serre à Bambey.



Figure 5 : Bassins plein air à Bambey.

Deux semaines après l'ensemencement, c'est le début de la récolte de spiruline. La filtration du milieu de culture permet de recueillir la spiruline. Pour cela, deux tamis en bois de 1m² à mailles fines (33 microns) sont utilisés pour recueillir le mélange. La figure 6 présente une photo de la table de filtration à Bambey.



Figure 6 : Table de filtration à Bambey

La spiruline recueillie après filtration forme une boue verte comme le montre la figure 7.



Figure 7 : Spiruline sous forme de boue verte (récoltée à Bambey)

La boue verte est pressée pendant 30mn, à la fin de l'opération "un fromage vert" est obtenu, illustré par la figure 8.



Figure 8: Spiruline sous forme de fromage vert (à Bambey).

Avec une extrudeuse (appareil manuel permettant la mise en spaghetti), le "fromage vert" est transformé en spaghetti avant le séchage (figure 9).



Figure 9 : Spiruline sous forme de spaghetti (à Bambey)

Après séchage, la forme spaghetti est broyée pour obtenir la spiruline sous forme de paillettes (figure 10).



Figure 10 : Paillettes de spiruline (à Bambey)

Les paillettes sont ensuite broyées (à Dakar) pour obtenir la spiruline sous forme de poudre (figure 11).



Figure11: Poudre de spiruline

C'est cette poudre qui est utilisée ultérieurement pour la fabrication (à Dakar) des comprimés (figure 12).



Figure12 : Comprimés de spiruline

II.4.4 Conservation de la spiruline

La spiruline a une durée de vie et de conservation de deux ans, à l'abri de la lumière et de l'humidité. Elle doit aussi être stockée à une température ambiante (25 à 27°C) [57].

II.5 QUALITE, TOXICITE, ET LEGISLATION

II.5.1 Qualité

La qualité de la spiruline est variable selon : la période de récolte, la température de séchage, la souche utilisée et la composition du milieu de culture [19].

➤ Protéines

La teneur en protéines peut décroître de 10 à 15% selon le moment de la récolte, celle en méthionine (AA soufré) de 30% selon le mode de séchage. Les conditions pour une teneur optimale sont une récolte au début de la photopériode et un séchage par pulvérisation au détriment des tambours chauffants [33].

➤ Vitamines

La chaleur et la granulométrie interviennent dans la conservation des teneurs en vitamines. Seshadri et al. [56] déconseillent le séchage par pulvérisation pour une meilleure conservation de la provitamine A [19].

La biodisponibilité de la vitamine B12 semble hautement dépendante de la souche de spiruline utilisée et des procédés de culture [33].

➤ Minéraux et acides gras

Des enrichissements dans le milieu de culture en Zinc, Fer, Sélénium, peuvent fortement augmenter la teneur en ces minéraux de la spiruline. Il est même possible d'enrichir la spiruline en acides gras [19].

II.5.2 Toxicité

La spiruline est d'une totale innocuité, elle ne présente aucune contre indication ou incompatibilité médicamenteuse [13]. Des essais menés sur des rats nourris avec de la spiruline naturelle comme seule source de protéines, n'ont montré aucun effet toxique [12].

La tératogénicité a été trouvée nulle pour trois espèces dans quatre étapes de gestation différentes, avec des concentrations de spiruline de 10,20 et 30% de la diète. De même, aucun effet mutagène ou de toxicité subaiguë ou chronique n'a été décelé [17].

La mutagénicité des urines d'animaux nourris de spiruline a été testée sur des bactéries (test d'Ames) sans effet [21]. Contrairement à l'immense majorité des aliments courants, la spiruline ne semble pratiquement jamais provoquer des réactions allergiques, que ce soit par ingestion ou par contact. Au contraire, une activité anti allergique semble liée à ce produit [62].

Les cyanotoxines ne seraient pas présentes dans la spiruline. Il existe aujourd'hui une méthode "Multiplex PCR"[51] de détection des gènes impliqués dans la synthèse des microcystines, qui sont des cyanotoxines présentes dans les cyanobactéries. Des analyses réalisées par un laboratoire indépendant ont montré l'absence de Beta-Nmethylamino-L-alanine (BMAA) dans la spiruline. Cependant il paraît important de vérifier si le gène responsable de la synthèse du BMAA existe dans le génome de la spiruline et si c'est le cas, de connaître les conditions de cultures qui provoquent ou non l'expression du gène [10].

A cause de ce risque, Gantar et Svircev [36] estiment qu'il vaut mieux extraire les molécules actives de la spiruline plutôt que la consommer directement. La spiruline accumule des métaux lourds mais en quantité en dessous des seuils de toxicité donnés par la FAO

[33].Cependant les mêmes auteurs recommandent des contrôles de teneurs en métaux lourds pour la spiruline destinée à l'alimentation humaine [36].

Dans un récent ouvrage, Chamorro et al. [18] rapportent que les évaluations de toxicité sur des animaux nourris à court et long terme avec de fortes doses de spiruline n'ont pas révélé de toxicité. Ils considèrent qu'il faut cependant être prudent avant d'extrapoler le modèle animal à l'homme.

II.5.3 Législation

La spiruline répond à la législation européenne sur les compléments alimentaires. Un décret a permis de fournir un cadre juridique complet pour les compléments alimentaires en transposant dans le droit national la majeure partie de la directive européenne n° 2002/46/CE [19]. Ce nouveau décret n° 2006/352 du 20 mars 2006, publié au Journal Officiel du 25 mars 2006, reprend la définition européenne des compléments alimentaires : "on entend par compléments alimentaires, les denrées alimentaires dont le but est de compléter le régime alimentaire normal et qui constituent une source concentrée de nutriments ou d'autres substances ayant un effet nutritionnel ou physiologique seuls ou combinés, commercialisés sous forme de doses, à savoir les formes de présentation telles que les gélules, les pastilles, les comprimés, les pilules et autres formes similaires, ainsi que les sachets de poudre, les ampoules de liquide, les flacons munis d'un compte-gouttes et les autres formes analogues de préparations liquides ou en poudre destinées à être prises en unités mesurées de faible quantité" [19].

L'étiquetage de ces produits doit comprendre la dénomination vente de "complément alimentaire", ainsi que d'autres informations comme le mode d'emploi détaillé, la dose journalière recommandée, la liste de toutes les substances utilisées lors de la fabrication, les précautions d'emploi. Ces produits doivent être enregistrés par la Direction Générale de la Concurrence, de la Consommation et de la Répression des Fraudes, après une évaluation préalable par l'Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments. La spiruline vendue en France est conforme à la législation. Dans plusieurs états africains, une Autorisation de Mise sur le Marché (AMM) est prévue pour la distribution de spiruline [19].

Au Sénégal, une Autorisation de Mise sur le Marché (AMM) a été déposée au niveau de la Direction de la Pharmacie et des Laboratoires par la FAES. Malgré que l'AMM ne soit pas encore accordée, on retrouve la spiruline dans certaines pharmacies et espaces, comme un complément alimentaire. Ainsi donc, à ce jour aucune législation n'est appliquée à la commercialisation de la spiruline au Sénégal.

II.6 AVANTAGES DE LA SPIRULINE

II.6.1 Pour la santé

Dans les pays développés, et depuis peu dans quelques régions d'Afrique, la spiruline est consommée comme complément alimentaire "bénéfique à la santé" [41]. Elle contribue à purifier le sang, à réduire le taux de cholestérol LDL et aide à l'absorption des minéraux. Elle combat le stress et régularise le taux de globules blancs et la glycémie. Dans les cas d'hypoglycémie, la spiruline, prise entre les repas, aide à stabiliser le taux de sucre dans le sang grâce à sa richesse en protéines. Elle améliore la vision nocturne et augmente l'endurance physique. Bonne pour les voies respiratoires, elle atténue les symptômes de l'asthme, prévient l'anémie, aide à la digestion et l'assimilation des aliments [55].

Elle est commercialisée dans le secteur des produits dits «Bio». La spiruline n'est pas un médicament, donc pas soumise à l'obligation de test d'efficacité : le dosage recommandé et la qualité du produit vendu ne sont pas nécessairement en adéquation avec les effets affichés [41].

II.6.1.1 Utilisation en nutrition

La spiruline est utilisée [41] :

- ❖ Pour une alimentation équilibrée et dans les régimes amaigrissants : par ses apports en micronutriments.
- ❖ Pour l'amélioration des capacités sportives : par ses teneurs en fer, en vitamine B12, et en β -carotène qui faciliteraient la récupération
- ❖ Pour lutter contre l'asthénie par son apport en oligoéléments et vitamines
- ❖ Pour ses effets sur la sénescence : par les propriétés anti oxydantes du β -carotène, de la phycocyanine et de la vitamine E, elle serait un frein au vieillissement des cellules.

II.6.1.2 Thérapeutique

La spiruline est utilisée [41] :

- ❖ **Pour son activité anticoagulante** : le *spirulane Calcique (Sp-Ca)* agirait en activant le cofacteur II de l'héparine, molécule qui inhibe la thrombine, donc la coagulation. Yamamoto et al [61] montrent les effets anticoagulants du *spirulane Sodique (Sp-Na)*, autre polysaccharide sulfaté spécifique à la spiruline.
- ❖ **Pour renforcer le système immunitaire** : la spiruline régulerait favorablement le système immunitaire en augmentant l'activation des macrophages, l'activité des cellules T et l'activité des cellules naturellement destructrices (Naturel Killer). Ce processus permettrait

la libération des gamma-interféron (IFN - γ), ce qui peut éventuellement rendre les virus inactifs. Ces actions se feraient par le biais des polysaccharides.

- ❖ **Pour son activité antivirale** : l'activité antivirale de la spiruline interviendrait selon deux mécanismes : une inhibition de la pénétration des virus et une inhibition de la phase de réplication des virus. Le composant lipide SQDG (sulfoquinovosyldiacylglycerol) de *Spirulina platensis* riche en sulfolipides a démontré par expérience in vitro sa capacité à inhiber la revers transcriptase du HIV-1 et du HIV-2.
- ❖ **Pour son activité anti tumorale** : la phycocyanine de la spiruline induirait un mécanisme d'apoptose (autodestruction) des cellules cancéreuses. D'après l'étude de Fedkovic et al [32] les antioxydants contenus dans la spiruline (β -carotène) permettraient d'inhiber à la fois l'effet mutagène et l'effet régulateur induit par les radicaux libres, freinant ainsi le développement du cancer. Zhang et al [65] considèrent que la spiruline pourrait améliorer la restauration de l'hématopoïèse chez l'homme et être ainsi utilisée comme traitement dans les thérapies anticancéreuses pour en diminuer les effets secondaires.
- ❖ **Pour son rôle dans la diminution du cholestérol** : les acides gras polyinsaturés (AGPI) Omega-3 et oméga-6 de la spiruline préviendraient l'accumulation de cholestérol dans l'organisme. Ceci pourrait expliquer en partie la diminution des taux en cholestérol et de triglycérides observée lors des expériences de Ramamoorthy, Premakumari [49] et Samuels et al [53].

II.6.1.3 Autres usages

Pour ses autres actions sur la santé : Une étude préliminaire sur l'homme et des essais sur des animaux ont démontré que l'ingestion de spiruline aidait au contrôle de la glycémie chez les personnes diabétiques [41] ; une activité anti-inflammatoire sur les articulations; une hépato protection ; dans la prévention de l'athérosclérose.

II.6.2 Dans l'agroalimentaire

En alimentation humaine la spiruline est utilisée comme colorant naturel dans les chewing-gums, sorbets, sucreries, produits laitiers, boissons non alcoolisées [19]. La phycocyanine est un des rares pigments naturels de couleur bleue. Elle apparaît également dans une gamme de produits algaux mélangée à du sel, des tagliatelles. En Suisse et au Japon, il existe depuis longtemps du pain à la spiruline [19].

II.6.3 Dans l'aérospatiale

L'agence spatiale européenne (ESA) s'est intéressée à la spiruline dans le cadre de son programme MELISSA (Micro-Ecological Life Support System Alternative). Ce projet,

prévoyait d'utiliser dans l'espace un écosystème artificiel fermé (avec cinq compartiments : consommateur, liquéfacteur, photo hétérotrophe, vitrificateur et photo autotrophe) composé de plantes supérieures et de micro-organismes, en vue des voyages à longue distance (Terre - Mars par exemple). Les plantes supérieures et la spiruline étaient utilisées dans le compartiment photo autotrophe, d'une part pour équilibrer la ration alimentaire, d'autre part pour régénérer l'atmosphère par photosynthèse. Commencé en 1989, ce programme implique à présent une dizaine d'équipes dans toute l'Europe et au Canada [19].

II.6.4 Spiruline à usage animal

La spiruline est utilisée comme complément nutritionnel en aquariophilie, en aquaculture, en agroalimentaire, pour des effets très spécifiques [19]:

- ❖ Amélioration de la croissance et de la fertilité des animaux : des études sur les poissons d'aquarium tels le *Xiphophorus helleri* et la crevette *Fenneropenaeus chinensis* ont montré les effets bénéfiques de *Spirulina platensis* dans ce domaine. L'influence bénéfique sur la croissance, le renforcement des défenses immunitaires des poulets de chair par l'incorporation de spiruline dans leur nourriture, ont été également démontrés [8].
- ❖ En aquaculture, les poissons d'élevage, beaucoup plus fragiles que les poissons sauvages, sont souvent soumis à des infections virales et/ou bactériennes qui peuvent être catastrophiques en bassin. Watanuki et al. ont mis en évidence l'effet immunostimulant de *Spirulina platensis* chez la carpe *Cyprinus carpio*. Des vétérinaires préconisent l'administration de spiruline à des animaux domestiques affaiblis [19].
- ❖ Augmentation de la pigmentation : la spiruline est utilisée pour sa richesse en caroténoïdes
 - ✚ En aquariophilie pour accentuer la coloration des poissons d'ornement tels le *Xiphophorus helleri* ou les carpes Koi
 - ✚ En aquaculture pour améliorer la pigmentation des crevettes et des poissons
 - ✚ En agroalimentaire pour accentuer la couleur des œufs et de la chair de poulet et les rendre plus attrayants au consommateur.
- ❖ Augmentation de la performance des animaux : elle est vendue pour la nutrition des taureaux reproducteurs, des chevaux de course.

II.6. 5 Marché de la spiruline

Il est très difficile d'obtenir des renseignements permettant de connaître la production mondiale actuelle et les coûts de la spiruline [19]. La production mondiale a régulièrement augmenté surtout depuis 1995. De 1400 tonnes en 1995, 3500 tonnes en 2000, elle était supérieure à 4000 tonnes en 2008 [19].

➤ Formes de distribution

La poudre sèche de spiruline est vendue dans beaucoup de pays sous forme de gélules ou de comprimés dans des magasins spécialisés en diététique, en parapharmacie, dans certains clubs sportifs (*body building*) et dans les rayons spécialisés en aliments de régime des grandes surfaces [19].

La spiruline a l'avantage d'être facilement assimilable par l'organisme. La posologie usuelle est de 5g par jour. La spiruline peut être consommée avec un verre d'eau ou un jus de fruits mais aussi on peut la consommer saupoudrée sur du fromage blanc ou des yaourts [57].

➤ Coûts

Dans les pays développés, la spiruline issue de la production industrielle est vendue au prix de gros sous forme de poudre de 16 € à 19 € le kg en qualité humaine et de 8 € à 13 € le kg en qualité animale. Elle apparaît sur le marché sous forme de comprimés à 200 € le kg et sous forme de gélules à 500 € le kg. La spiruline issue des productions artisanales en France, est vendue de 75 € le kg (prix de gros) à 130 € le kg (prix au détail) [19].

En Afrique, les prix de vente sont bien inférieurs : généralement de 25 € à 40 € le kg, très variable selon le prix de revient, mais relativement bon marché [19]. Au Sénégal le prix de vente du flacon de 120g sous forme comprimés de spiruline est de 7000 FCFA.