

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université de Ghardaia



Faculté des Sciences de la Nature et de Vie et Sciences de la Terre
Département de Biologie

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Science biologiques

Spécialité : Microbiologie appliquée

Par : KEROUILA Nadia

LAOUAR Assma

REZMA Naila

Thème

**Culture et caractérisation de la spiruline dans la région de
Ghardaïa**

Soutenu publiquement, le 12 / 06 /2024, devant le jury composé de :

M.BAKLI A	Maitre de conférences B	Univ. Ghardaïa	Président
Mr. KADRI M	Maitre de conférences B	Univ. Ghardaïa	Directeur de mémoire
Mme.BOUTARFAIA A	Maitre de conférences B	Univ. Ghardaïa	Examineur 1

Année universitaire : 2023 /2024

Remerciements

Ontient tout d'abord à exprimer notre profonde gratitude envers Dieu Tout-Puissant, denous avoir accordé la force, la santé et la sagesse nécessaires à la réalisation de ce travail. Sans Sa grâce et Ses bénédictions, ce mémoire n'aurait pas été possible.

On remercie sincèrement **Mr. KADRI M**, pour son soutien, ses conseils avisés tout au long de cette recherche.

On tient également à exprimer ma reconnaissance aux membres du jury, **M. BAKLI A** et **Mme.BOUTARFAIA A**, pour avoir accepté d'évaluer ce mémoire. Vos commentaires constructifs et vos observations pertinentes vont grandement contribuer à l'amélioration de ce travail.

À nos familles, on vous doit beaucoup plus que des remerciements. Votre amour, votre encouragement et votre soutien moral inconditionnel nous ont permis de surmonter les moments difficiles et de persévérer jusqu'à la fin.

On remercie Mr. HIRI Abdelkader d'avoir nous acceptées de faire un stage dans son établissement à Tamanrasset et de nous autoriser de travail par la souche SpirulHIRI.

On remercie également tous les professeurs de l'Université de Ghardaïa qui nous ont partagé leur savoir et leur expertise tout au long de notre parcours académique. Vos enseignements ont été une source d'inspiration et de motivation constante.

Enfin, on tient à remercier toutes les personnes qui nous ont aidé de près ou de loin dans la réalisation de ce mémoire. Que ce soit par un mot d'encouragement, une aide technique ou un simple geste de soutien, votre contribution a été inestimable.

Merci à tous

Dédicaces

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère.

*A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse : **mon adorable mère** Dalila Mokhtara .

***À mes chers frères** Mohamed El aid, Hadj Ali, Wail et Abd El Mouain(reazy)

Je vous dédie ce texte avec tout mon cœur, vous avez été mes confidents, mes protecteurs et mes modèles Je suis tellement chanceux de vous avoir dans ma vie j'admire votre force, votre courage, votre intelligence et votre humour.

*À mon support dans ma vie, qui m'a appris m'a supporté et ma dirigé Vers la gloire...**ma sœur** Soumia.

***Aux petits et les anges de la famille** Mayasin-Orjwan-Rawan-Djana-Sirine-Malak-Louai.

* **À tous mes chers cousines et cousins**, en particulier ma tante Sabah-Hamida-Fatiha-Hadil-Imane-Achwak et Haithem.

***A mon oncle** Abd El Rahman, Toufik et à Tadj Eddine qui n'ont pas cessé de me conseiller, encourager et soutenir tout au long de mes études. Que Dieu les protège et leurs offre la chance et le bonheur.

***À toutes mes amis**, vous été pour moi le meilleur compagnon dans toutes les étapes de mes études Chaima -Soundous-Amouna-Chaima ben-Khadidja-Djamaa-Amaria-Djuhina-Loubna-Amira-Rita-Maria et Zineb arara.

Sans oublier **mes binômes** Nadia et Assma pour leur soutien moral, leur patience et leur compréhension tout au long de ce projet.

*Et finalement à **mon univers et Mon inséparable** Aflah.

Naila

Dédicaces

À MON TRÈS CHER PÈRE : LAOUAR Mohammed

Autant de phrases et d'expressions aussi éloquentes sont-elles ne sauraient exprimer ma gratitude et ma reconnaissance. Tu as su m'inculquer le sens de la responsabilité, de l'optimisme et de la confiance en soi face aux difficultés de la vie. Tes conseils ont toujours guidé mes pas vers la réussite. Ta patience sans fin, ta compréhension et ton encouragement sont pour moi le soutien indispensable que tu as toujours su m'apporter. Je te dois ce que je suis aujourd'hui et ce que je serai demain et je ferai toujours de mon mieux pour rester ta fierté et ne jamais te décevoir.

À MA TRÈS CHÈRE MÈRE : AHDOD Kheira

Autant de phrases aussi expressives soient-elles ne sauraient montrer le degré d'amour et d'affection que j'éprouve pour toi. Tu m'as comblé avec ta tendresse et affection tout au long de mon parcours. Tu n'as cessé de me soutenir et de m'encourager durant toutes les années de mes études, tu as toujours été présente à mes côtés pour me consoler quand il fallait. En ce jour mémorable, pour moi ainsi que pour toi, reçoit ce travail en signe de ma vive reconnaissance et ma profonde estime. Puisse le tout puissant te donner santé, bonheur et longue vie afin que je puisse te combler à mon tour. Puisse Dieu, le Très Haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie.

À Mes chers et adorables sœurs « Zineb, Oumsaad et Rekia »

Vous m'avez toujours soutenue, encouragée, supportée durant ces longues années d'études, vous avez toujours cru en moi et de m'avoir fait confiance. Merci pour tout ce que vous faites pour moi. Que Dieu, le tout puissant, vous protège et vous garde.

À mon oncle Ahmed, Zouheir, Abdelaziz et ma tante Aida.

Qui n'ont jamais cessée de me soutenir et de m'épaulées tout au long de mes études.

À tous les membres de la famille LAOUAR et AHDOD.

À toutes les personnes modestes, généreuse et compréhensible.

Je remercie toutes celles et tous ceux qui m'ont aidé d'une manière ou d'une autre à la réalisation de ce travail

A tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment.

(الى روح جدي و عمتي رحمهم الله)

Assma

Dédicaces

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu « le tout Puissant » de nous avoir accordé la force et le courage afin de réaliser ce modeste travail.

À Mes chers parents

Ahmed et Aicha qui ont été toujours à mes côtés et m'ont toujours soutenu tout au long de ces longues années d'études.

A ma sœur Farida et mes frères Hicham, Taha et Walid.

À tous mes amis.

A Tous ceux qui me sont chers,
aux personnes qui m'ont aidé et encouragé de près ou de loin, qui étaient toujours à mes côtés et qui m'ont accompagné durant mon chemin d'études.

Nadia

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Photo d'une femme kanembou " écrémant " la spiruline de la surface du Lac Rombou.	6
Figure 2. Représentation des deux genres Spirulina (A) et Arthrospira(B).....	13
Figure 3. Morphologie de la spiruline : (A)sous microscope optique ;(B) Micrographie électronique d' <i>Arthrospira platensis</i> ;(C) Micrographie électronique d'un trichome d' <i>Arthrospira platensis</i> ;(D) Micrographie électronique	15
Figure 4. Distribution géographique naturelle de <i>Spirulina platensis</i>	16
Figure 5. Cycle biologique de La spiruline.....	17
Figure 6. Teneur moyenne et principales fonctions des acides aminés essentiels de la spiruline.....	19
Figure 7. La souche de spiruline <i>Arthrospira platensis</i>	31
Figure 8. L'ensemencement	32
Figure 9. Mesure du pH et de la température.....	33
Figure 10. Filtration et récolte	36
Figure 11. Evolution de la température du milieu de culture de la Spiruline durant 7 jours.	38
Figure 12. Evolution du pH dans le milieu de culture de Spiruline	39
Figure 13. Evolution des valeurs de l'absorbance de la spiruline.	40
Figure 14. Observation microscopique de la spiruline.....	41

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Caractéristiques communes des cyanobactéries aux algues et aux bactéries.....	10
Tableau 2. Classification suivant le CIN.	11
Tableau 3. Classification suivant l'ICNB.	12
Tableau 4. Teneur moyenne et principales fonctions des vitamines liposolubles de la spiruline.	21
Tableau 5. Teneur moyenne et principales fonctions des vitamines hydrosolubles de la spiruline.	21
Tableau 6. Teneur moyenne et principales fonctions des minéraux et des oligoéléments de la spiruline.....	22
Tableau 7. Teneur moyenne et principales fonctions des pigments de la spiruline.	24
Tableau 8. La composition chimique d'un milieu de culture typique pour la spiruline.	27
Tableau 9. Différentes productions de spiruline et leurs caractéristiques.	28
Tableau 10. La composition de milieu HIRI.	32
Tableau 11. Résultat de contrôle microbiologique	42

LISTE DES ABREVEATIONS

UI : Unité internationale.

OMS : Organisation mondiale de la Santé.

FAO : Organisation pour l'alimentation et l'agriculture.

WoRMS : world register of marine species.

ADN : Acide désoxyribonucléique.

AJR : Apports Journaliers Recommandés.

SOD : Superoxyde dismutase.

pH : potentiel hydrogène.

Mg : milligramme.

Kg : kilogramme.

Mm : millimètre.

TABLE DES MATIÈRES

Introduction	1
Chapitre I : Synthèse bibliographique	3
1. La spiruline,	4
2. Origine de la spiruline : découverte et histoire	4
2.1 Découverte	4
2.2 Histoire de la spiruline : entre légende et réalité	6
3. Les différentes sortes de spiruline	8
4. Caractéristiques de la spiruline.....	9
4.1 Confusions générales liées au terme de la spiruline	9
4.2 Algue ou bactérie	10
5. Classification de la spiruline	10
5.1 Histoire de la classification	10
5.2 Systématique de la spiruline.....	11
5.3 Genre.....	12
5.4 Espèces ou souches ?	13
6. Morphologie et caractères généraux	14
7. Répartition géographique naturelle	15
8. Reproduction.....	17
9. Génome.....	17
10. Ecologie	18
11. Composition de la spiruline.....	18
11.1 Protéines.....	18
11.2 Lipides.....	19
11.3 Glucides	20
11.4 Acides nucléiques.....	20
11.5 Vitamines	21
11.6 Minéraux et oligoéléments	22
11.7 Pigments.....	23
11.8 Enzymes.....	24
12. Principales applications de la spiruline.....	24
12.1 En alimentation humaine	24
12.2 En alimentation animale	25
12.3 En cosmétique	25
12.4 En thérapeutique.....	26
13. Culture de la spiruline	26
13.1 Milieu de la culture.....	26

13.2 Conditions de la culture	27
14. Production de la spiruline	27
14.1 Production artisanale	28
14.2 Production industrielle	28
15. Toxicité	28
Chapitre II : Matériel et méthodes.....	31
1. Matériels	31
1.1 Matériels biologique.....	31
2. Méthodes d'étude.....	31
2.1 Préparations de milieux de culture	31
2.2 Ensemencement.....	32
2.3 Les conditions de culture.....	33
3. Suivi la croissance d' <i>Arthrospira platensis</i>	33
3.1 Mesure des paramètres physico-chimiques	33
3.2 Mesure de l'absorbance.....	34
3.3 Etude des caractéristiques de la spiruline	34
3.3.1 L'étude morphologique	34
3.4 Analyse microbiologique.....	34
3.4.1 <i>Staphylococcus aureus</i>	34
3.4.2 Les coliformes fécaux.....	35
3.4.3 Spores de bactéries anaérobies sulfite réducteurs :.....	35
3.5 Récolte	36
Chapitre III : Résultats et discussion.....	38
1. Evolution des paramètres physico-chimiques.....	38
1.1 Température	38
1.2 pH.....	38
2. Evolution de la biomasse.....	39
3. Les caractéristiques de la spiruline.....	40
4. Récolte	41
5. Qualité microbiologique.....	42
Conclusion.....	44
Références bibliographiques.....	45
Annexes.....	50
Résumés.....	54

Introduction

Introduction

Les algues bleues, bien que leur nom suggère quelque chose d'algues, sont en réalité des cyanobactéries, des organismes microscopiques photosynthétiques (CIUSSS MCQ, 2020; Wikipédia, 2024). Elles se distinguent des algues véritables par leur composition cellulaire et leur mode de vie. Les algues bleues se développent généralement en été ou en automne dans des eaux peu profondes, tièdes ou chaudes (CIUSSS MCQ, 2020).

Les algues bleues sont responsables de proliférations massives, appelées "fleurs d'eau", qui peuvent causer des problèmes sanitaires et environnementaux. Lorsqu'elles se multiplient fort, elles peuvent changer la couleur de l'eau et former une couche flottante sur la surface. Les contacts avec les algues bleues peuvent entraîner des symptômes tels que des maux de ventre, des diarrhées, des nausées, des fièvres, des irritations de la peau et de la gorge (CIUSSS MCQ, 2020).

Contrairement aux algues bleues, la spiruline est une cyanophycée (algue bleue) apparue il y a environ 3,5 milliards d'années aux côtés des premiers êtres vivants. Bien qu'elle appartienne à la même famille que les algues bleues, la spiruline est cultivée et consommée de manière contrôlée. Elle est utilisée comme aliment et source de nutriments et est considérée comme l'aliment naturel le plus complet de notre planète (Cruchot, 2008). En effet, cette microalgue représente une source alimentaire offrant jusqu'à 70 % de protéines, ainsi que des sels minéraux, des oligo-éléments et de nombreuses vitamines (Djaghoubi, 2013).

La spiruline a fait l'objet d'études approfondies et son utilisation est désormais répandue dans le monde entier en tant que produit alimentaire et complément. Cette popularité a attiré l'attention des chercheurs depuis de nombreuses années, comme en témoignent les centaines de publications traitant de ses divers aspects. Son potentiel bénéfique a été expérimentalement prouvé, à la fois *in vitro* et *in vivo*, dans le traitement de diverses pathologies, ainsi que dans la prévention de l'hypercholestérolémie, de certaines maladies inflammatoires, des allergies, du cancer, de la toxicité médicamenteuse, des infections virales, des maladies cardiovasculaires et du diabète (Djaghoubi, 2013).

La spiruline est cultivée dans les régions où elle se trouve naturellement, telles que l'Afrique, l'Asie et l'Amérique, mais aussi dans des installations spécialement conçues pour sa production à grande échelle. En Europe, sa culture se fait sous serres ou dans des photobioréacteurs.

En Algérie, le premier colloque sur la spiruline s'est tenu entre le 18 et le 25 avril 2004, à Tamanrasset. L'objectif était d'informer les représentants des administrations locales, des

services de la santé, de l'agriculture et de l'enseignement sur l'intérêt du développement de la culture de cette algue dans la région, avec l'intention de l'étendre à toute l'Algérie. La principale source d'énergie pour la spiruline est la lumière solaire donc les régions au climat désertique, telles que le Sahara, sont idéalement situées pour la culture de la spiruline (Ferhat & Lakehal, 2019).

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre travail, dont l'objectif consiste la culture et la caractérisation de la spiruline à partir d'eau de la région de Ghardaïa étant donné que c'est une région du Sud.

Ainsi, pour répondre à l'objectif, nous avons opté pour le plan de travail suivant :

- Nous avons consacré, la première partie de ce mémoire aux notions théoriques pour comprendre le sujet, des notions autour de la spiruline ;
- La seconde partie récapitule toutes les méthodes d'analyses utilisées pour pouvoir répondre à la thématique ;
- La troisième partie résume les principaux résultats trouvés.

Ces trois parties sont suivies d'une conclusion générale.

CHAPITRE I : Synthèse bibliographique

1. La spiruline :

Autrefois connue sous le nom d'algue bleue, la spiruline est l'un des microorganismes les plus anciens de la Terre, apparu il y a environ 3,6 milliards d'années. Elle appartient aux cyanobactéries, l'une des premières formes de vie, situées à la frontière entre le règne végétal et animal. Ces cyanobactéries étaient responsables de la production d'oxygène à partir du dioxyde de carbone, contribuant ainsi à rendre l'atmosphère respirable et favorisant une vie aérobie. De plus, elles servaient de source alimentaire aux poissons, aux mammifères marins et à l'espèce humaine. La capacité de la spiruline à survivre aux périodes glaciaires réside dans sa faculté à se rétracter, attendant des conditions plus favorables, un peu comme si elle hibernait.

La spiruline est habituellement décrite comme une micro-algue en forme de spirale et elle mesure moins de la longueur d'un demi-centimètre. De couleur bleu-vert, elle se compose de filaments mobiles très petits, non ramifiés, enroulés en spirale, généralement avec 6 ou 7 spires, bien que les spirales puissent varier. Ces variations sont directement liées aux conditions écologiques rencontrées dans leur habitat, présentant des formes spiralées classiques, ondulées, voire droites. *Arthrospira platensis* est l'espèce principale disponible sur le marché, mais il existe 36 autres espèces d'*Arthrospira* qui sont comestibles (Levesque & Parise, 2019).

2. Origine de la spiruline : découverte et histoire

2.1 Découverte

La spiruline a été découverte par le professeur Creac'h dans les années 1940. Avant cela, elle était déjà connue et consommée par les Aztèques au Mexique et les Kanembous au Tchad (Dihé, 2019).

Les origines mexicaines

À l'arrivée de Christophe Colomb dans le Nouveau Monde en 1492, le Mexique regorgeait non seulement d'or et d'argent, mais également de divers produits alimentaires inconnus jusqu'alors dans le Vieux Monde, tels que la tomate, le dindon, la pomme de terre, le cacao, et bien d'autres encore. Également, il découvrit le Tecuitlatl, décrit par les chroniqueurs de la Conquête espagnole comme une étrange substance alimentaire récoltée dans le lac Texcoco. Les habitants la ramassaient avec des filets puis la faisaient sécher au soleil. Tecuitlatl, qui

signifie "Produit de la pierre" en nahuatl, était ainsi nommé en raison de la croyance répandue au Mexique à l'époque selon laquelle il existait un règne minéral en plus des règnes végétal et animal.

Aujourd'hui, le Tecuitlatl est communément appelé spiruline en raison de sa structure hélicoïdale, bien que sa taille semi-microscopique d'environ un quart de millimètre ne permettait pas, au XVe siècle, de discerner les détails de sa forme. Il s'agit d'une algue bleu-vert, une cyanobactérie, particulièrement riche en protéines. Elle contient tous les acides aminés essentiels, notamment ceux qui étaient en quantité insuffisante dans l'alimentation de base des Mexicains de l'époque, principalement le maïs.

Cependant, les Conquistadors espagnols, méprisant le Tecuitlatl, ont asséché les lacs pour créer des terres arables et des pâturages. Son utilisation a progressivement décliné, mais n'a jamais totalement disparu. Après la conquête espagnole, le lac Texcoco a été progressivement asséché et une importante industrie chimique, Sosa Texcoco, s'y est établie. Ce n'est que dans les années 1960 qu'Hubert Durand-Chastel, directeur général de cette entreprise, a redécouvert la spiruline par pur hasard et que le docteur Maurice David, pharmacien, a baptisé *Arthospira*, un ancien nom de la spiruline.

En 1967, l'Institut Français du Pétrole (IFP) a présenté lors du 7ème congrès international du Pétrole à Mexico, une conférence sur la spiruline consommée dans le lac Tchad par les Kanembous (TechnAp, 2018).

Les origines tchadiennes

Les Aztèques utilisaient la spiruline séchée comme complément alimentaire pour leurs coursiers qui transportaient du poisson frais. Les Kanembous, quant à eux, récoltaient la boue verte à la surface des mares et la faisaient sécher sous forme de galettes, qu'ils vendaient au marché ou consommaient en famille (Dihé, 2019).

Au fait, au tout début l'histoire a commencé quand Creach, un pharmacien des troupes coloniales françaises basées à Fort Lamy (aujourd'hui N'Djamena), s'est trouvé intrigué par des galettes vendues sous le nom de "dihé" sur les marchés de Massakori, un village situé à 50 km du lac Tchad. Après, 20 ans et pendant le tournage d'un film au Tchad, deux ethnologues, Max-Yves Brandily et son épouse Monique, ont été captivés par la couleur bleu-vert singulière des berges des marigots du Karen, ainsi que par le rituel des femmes qui allaient récolter une sorte de plancton, qu'elles faisaient sécher au soleil sur le sable pour en

confectionner des galettes vendues sur les marchés sous le nom de "dihé". À son retour en France en 1959, Brandily a publié dans Sciences et Avenir un article intitulé : "Depuis des lustres, une tribu primitive du Tchad exploite la nourriture de l'an 2000". Ensuite, c'est au tour du botaniste belge Jean Léonard, qui participait à l'expédition Transsaharienne belge de 1964-1965, d'être fasciné par la récolte sur les rives du lac Tchad de l'algue bleue par les femmes, ainsi que par le fait que les enfants Kanembous ne souffraient pas de malnutrition. En 1964, Léonard et son collègue Compère ont identifié l'espèce *Spirulinaplantensis*, analysé le dihé et confirmé les résultats de Dangeard (TechnAp, 2018).

Comme indiqué précédemment, la spiruline prospère principalement dans les régions chaudes du monde, avec une présence significative au Mexique et au Tchad. Cela conduit à l'identification de deux espèces distinctes de spiruline :

- *Arthrospira maxima* (Mexique), tecuitlatl (nom local au Mexique) ;
- *Arthrospira platensis* ou *Spirulinaplantensis* (Tchad), dihé (nom local au Tchad) (Sguera, 2008).



Figure 1. Photo d'une femme kanembou "écrémant" la spiruline de la surface du Lac Rombou.

2.2 Histoire de la spiruline : entre légende et réalité

La spiruline a été utilisée par de nombreuses civilisations dès l'Antiquité, notamment par les Aztèques et les populations vivant autour du lac Tchad. Plusieurs légendes circulent autour de l'origine de l'utilisation de la spiruline (Menal et al., 2021).

➤ Au XV^{ème} siècle

Sur les rives du lac Tchad, les algues sont poussées par le vent vers le rivage, où elles forment un épais tapis de verdure récolté par les Kanembous. Cette spiruline est collectée dans des pots en argile, puis égouttée à travers des sacs en tissu et séchée au soleil. Une fois séchée, elle est transformée en galettes appelées dihé, qui sont ensuite vendues sur les marchés locaux. Le dihé est souvent émietté dans une sauce à base de tomates, de piments et d'épices, et est servi avec du mil pilé cuit à l'eau. Une légende raconte que les femmes enceintes consommaient abondamment le dihé, croyant que sa couleur sombre protégerait leurs fœtus du mauvais œil (Ahounou, 2018).

➤ Au XVI^{ème} siècle

L'histoire raconte que l'empereur Moctezuma était un grand amateur de poisson frais. Cependant, son palais était situé à une altitude de 200 mètres et à une distance de 300 kilomètres de la mer. À une époque où il n'y avait ni chevaux ni moyens de conservation comme la glace, en raison du climat tropical, le transport de ce produit périssable était confié à des coureurs athlétiques qui se relayaient pour apporter du poisson frais à leur empereur grâce à la consommation de tecuitlat (Ahounou, 2018).

Vers la fin du XVI^e siècle, le tecuitlat sombrera probablement dans l'oubli, surtout après que les lacs aient été asséchés pour céder la place au développement urbain et agricole. Aujourd'hui, le lac Texcoco demeure le seul témoignage de cette époque (Ahounou, 2018; Menal et al., 2021).

➤ De 1844 à 1996

En **1844**, près de Montevideo, deux chercheurs, Wittrock et Nordstedt, ont identifié une microalgue bleu-vert hélicoïdale baptisée *Spirulina jenneri f. platensis*.

En **1852**, Stizenberger a publié le premier rapport taxonomique de cette algue, lui donnant le nom d'*Arthrospira* en raison de sa forme en hélice et de sa structure multicellulaire.

Pendant la Seconde Guerre mondiale en **1940**, Creach, un pharmacien a découvert des galettes d'algues séchées appelées dihé, suscitant un vif intérêt. En France, le botaniste Dangeard a présenté l'expérience de Creach à la Société Linnéenne de Bordeaux en 1940, mentionnant pour la première fois l'utilisation de la spiruline dans l'alimentation humaine. Publié pendant la guerre, son compte rendu est passé inaperçu.

En **1959**, l'anthropologue Max-Yves Brandily a publié un article dans Science et Avenir sur ces gâteaux d'algues.

En **1967**, la spiruline a été reconnue comme une merveilleuse source alimentaire pour l'avenir par l'Association Internationale de Microbiologie Appliquée.

En **1970**, l'Américain Ripley FOX, microbiologiste, a perçu la spiruline comme un complément nutritionnel optimal et une solution au problème de la faim dans le monde. Il a décidé d'en faire un outil politique humanitaire et a fondé en **1971** une association pour lutter contre la malnutrition par la culture d'algues, développant ainsi le concept de fermes de spiruline.

En **1974**, la FDA a reconnu les bienfaits de la spiruline, et la même année, la Conférence mondiale de l'alimentation des Nations unies l'a désignée comme la "meilleure nourriture pour l'avenir". Elle peut être légalement commercialisée comme aliment ou complément nutritionnel si elle est étiquetée correctement et ne contient pas de substances contaminées ou altérées. Elle peut être incorporée dans divers produits alimentaires tels que les pâtes, les barres de céréales ou utilisée comme colorant alimentaire.

En **1996**, l'OMS a également déclaré la spiruline comme la "meilleure nourriture pour l'avenir" (Ahounou, 2018; Menal et al., 2021).

3. Les différentes sortes de spiruline

Il existe diverses variétés de spiruline à consommer, chacune présentant des propriétés nutritionnelles, des bienfaits pour l'organisme et des nuances de couleur spécifique. Voici une liste des différentes variétés de spiruline :

- **Spiruline *Arthrospira platensis* :**

C'est la variété de spiruline la plus répandue en culture. Elle est abondante en protéines, en vitamines, en minéraux et en antioxydants. Son ingestion peut favoriser le renforcement du système immunitaire, la réduction de l'inflammation, la régulation de la glycémie et l'amélioration de la santé cardiovasculaire.

- **Spiruline *Arthrospira maxima* :**

La Spiruline *Arthrospira maxima* est de taille plus importante que la Spiruline *Arthrospira platensis* et présente une concentration accrue en nutriments tels que la vitamine B12, la vitamine E et le sélénium. Elle peut contribuer à améliorer la santé des yeux, à abaisser le taux de cholestérol et à stimuler la production d'énergie.

- **Spiruline *Arthrospira fusiformis* :**

Cette variété de spiruline est abondante en acides gras essentiels et en protéines. Elle peut favoriser la santé cérébrale, stimuler la circulation sanguine et renforcer les défenses immunitaires.

- **Spiruline d'eau douce :**

Cette variété de spiruline est spécialement cultivée pour sa haute teneur en phycocyanine, un antioxydant bénéfique pour la protection contre les dommages causés par les radicaux libres. Elle peut également contribuer à maintenir la santé du cœur et à améliorer les fonctions cérébrales.

- **Spiruline de mer :**

La spiruline de mer est abondante en minéraux comme le sel et le magnésium, ce qui peut contribuer à équilibrer les électrolytes dans l'organisme. De plus, elle peut favoriser la santé du système nerveux et aider à réduire le stress oxydatif (Eden, 2023).

4. Caractéristiques de la spiruline

4.1 Confusions générales liées au terme de la spiruline

La distinction entre les termes *Spirulina*, Spiruline et *Arthrospira* est souvent floue. Cette confusion est aujourd'hui exacerbée par la commercialisation du produit industriel "Arthrospira" sous le nom inapproprié de "Spiruline", ce qui complique davantage la nomenclature. Ces confusions résultent à la fois d'erreurs dans la détermination scientifique.

Dans les années cinquante, trois définitions distinctes sont apparues pour clarifier les termes relatifs à la spiruline :

- **Spiruline :** C'est le nom commercial d'une cyanobactérie alimentaire qui appartient toujours au genre *Arthrospira* ;
- **Spirulina :** C'est le nom commercial anglais d'une cyanobactérie ;
- **Spirulina :** est également un nom scientifique désignant un genre de cyanobactérie assez éloigné des *Arthrospira*. Des exemples incluent *Spirulina subsalsa*, *Spirulina major*, etc. Aucune cyanobactérie du genre *Spirulina* n'a été scientifiquement évaluée pour son utilisation alimentaire, et il n'existe aucun commerce de cyanobactéries du

genre *Spirulina*. Les spirulines sont des cyanobactéries filamenteuses composées de plusieurs dizaines de cellules alignées de manière fortement spiralée.

- **Arthrospira** : C'est le nom scientifique d'un genre de cyanobactérie assez distinct du genre *Spirulina*. Le genre *Arthrospira* englobe toutes les cyanobactéries alimentaires vendues sous le nom de Spiruline (*Spirulina* en anglais) (Ahounou, 2018; Arbaoui & Bourdjiba, 2022; Menal et al., 2021).

4.2 Algue ou bactérie ?

La spiruline est une bactérie procaryote à Gram négatif faisant partie des cyanobactéries. Bien que ces dernières partagent certaines caractéristiques avec les algues, elles appartiennent en réalité au règne bactérien. Les cyanobactéries présentent des similitudes avec les algues et les bactéries, comme indiqué dans le tableau ci-dessous (Menal et al., 2021):

Tableau 1. Caractéristiques communes des cyanobactéries aux algues et aux bactéries.

Algues	Bactéries
Chlorophylle A	Absence de membrane nucléaire
Deux photosystèmes I et II	Absence de membrane plastidiale
Photosynthèse : production d'O ₂	Absence de mitochondries
Pigments photosynthétiques : phycobiliprotéines	Absence de réticulum endoplasmique et dictyosome
Eau : donneur d'électrons	Paroi cellulaire Gram - : muréine

5. Classification de la spiruline

5.1 Histoire de la classification

La spiruline a été initialement décrite par Wittrock et Nordsted en **1844** sous le nom de *Spirulina jenneri plantensis* Nordsted.

En **1960**, une distinction entre les procaryotes et les eucaryotes a été établie, se basant sur l'organisation cellulaire différenciée.

Après deux ans, en **1962**, Stanier et ses collaborateurs ont observé que cette "algue bleue verte" ne présentait pas de compartiments cellulaires, ce qui l'a classée parmi les procaryotes. Ils ont proposé de la nommer "cyanobactérie", avec le préfixe d'origine grecque "cyano, cyan"

faisant référence au pigment bleu, la phycocyanine, qui la compose. Cette nouvelle appellation a été acceptée et est apparue pour la première fois dans le "Bergey's Manual of Determinative Bacteriology" en 1974 (Ahounou, 2018; Arbaoui & Bourdjiba, 2022; Menal et al., 2021).

5.2 Systématique de la spiruline

La classification taxonomique des cyanobactéries est régie par deux codes distincts : les codes botaniques et bactériologiques.

- **Selon le Code international de nomenclature pour les algues, les champignons et les plantes (CIN) :**

La classification repose sur des critères morphologiques permettant une identification facile des genres. Les cyanobactéries y sont désignées sous les noms d'algue bleue, cyanophyte ou cyanophycée. La classification botanique est disponible sur les sites en ligne "Catalogue of Life" et "ITIS". Les informations extraites de ces deux sites ont été condensées dans le tableau suivant (Arbaoui & Bourdjiba, 2022):

Tableau 2. Classification suivant le CIN.

Règne	Monera
Sous Règne	Negibacteria
Division	cyanobacteria
Classe	Cyanophyceae
Ordre	Nostocales
Famille	Oscillatoriaceae
Genre	<i>Arthrospira</i> (stizenberger) ex gomont 1893
Espèce	- <i>Arthrospira gomontiana</i> setchell 1895. - <i>Arthrospira jenniferi</i> stizenberger ex gomont 1893. - <i>Arthrospira neopolitana</i>

▪ Selon le code ICNB « International Code of Nomenclature of Bacteria » :

Selon ce code, la classification en espèce nécessite, en plus des critères de la classification botanique, la prise en compte de caractéristiques physiologiques, biochimiques et génétiques établies sur des souches pures en culture. Cette classification bactériologique est disponible sur plusieurs sites internet.

- La première classification provient des sites Web WoRMS "World Register of Marine Species" et Cyano DB. On y retrouve des classifications similaires.

- La deuxième classification provient des sites AlgaeBase, NCBI et Uniprot. Les classifications sont également similaires.

Les données extraites de ces cinq sites internet, concernant la classification bactériologique de la spiruline, ont été synthétisées dans le tableau suivant (Ahounou, 2018; Menal et al., 2021):

Tableau 3. Classification suivant l'ICNB.

	WoRMS/CyanoDB	Algaebase/NCBI/Uniprot
Empire		Prokaryota
Règne	Bacterie	Eubacteria
Sous règne	Gracilicutes	Negibacteria
Division	Cyanobacteria	Cyanobacteria
Classe	Cyanophyceae	Cyanophyceae
Sous classe	Oscillatoriothycidae	Oscillatoriothycidae
Ordre	Oscillatoriales	Oscillatoriales
Famille	Phormidiaceae	Microcoleaceae
Sous famille	Phormidio	
Genre	<i>Arthrospira</i> Stizenberger ex Gomont, 1892	<i>Arthrospira</i> Stizenberger ex Gomont

Source :(Ahounou, 2018).

5.3 Genre

Selon différents auteurs, deux termes, *Arthrospira* ou *Spirulina*, sont proposés pour désigner la spiruline :

- *Spirulina*(de Turpin) pour désigner une forme aseptée.

- *Arthrospira* (de Stizenberger) pour désigner une forme avec un septum visible.

Concernant les différences morpho-anatomiques. On peut dire que :

- *Spirulina* : on des trichomes en hélice presque fermée, ont une paroi cellulaire difficilement visible (gaine non prononcée), ont une taille des cellules de 2 à 4 μm , et il existe peu (ou parfois il n'existe pas) de constriction entre cellules adjacentes, ils ont une mobilité permanente par rotation. Ils se reproduisent par scission simple (fragmentation du trichome en hormogonies sans les cellules nécrétiques) avec division de toutes les cellules. Leur ADN contient de 44 à 53 % de G+C ;
- *Arthrospira* : on des trichomes en hélice ouverte, ont une paroi cellulaire visible si les vacuoles à gaz ne sont pas trop nombreuses, ont une taille des cellules de 6 à 12 μm de large, et il existe des constriction entre cellules adjacentes, ils ont une mobilité par rotation. Ils se reproduisent par scission simple (fragmentation du trichome en hormogonies à partir des cellules nécrétiques) avec division de toutes les cellules sauf les cellules apicales. Leur ADN contient 43 % de G+C (Ahounou, 2018; Menal et al., 2021);

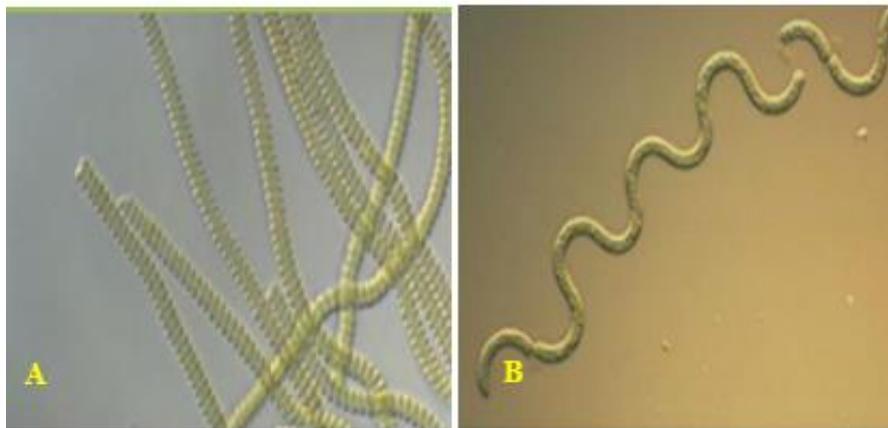


Figure 2. Représentation des deux genres *Spirulina* (A) et *Arthrospira* (B) sous microscope optique.

5.4 Espèces ou souches ?

Les chercheurs étudiant la spiruline ont initialement pensé qu'il existait de nombreuses espèces d'*Arthrospira*, mais l'analyse de leurs caractéristiques génétiques effectuée par Scheldeman et ses collaborateurs en 1999, basée sur l'ARDA (Amplified Ribosomal DNA Restriction Analysis), n'a révélé que deux espèces presque identiques d'*Arthrospira*. Ils ont alors supposé que plusieurs souches dérivent de ces deux espèces.

Les deux espèces les plus fréquemment utilisées dans l'alimentation sont *Arthrospira platensis* et *Arthrospira maxima*. Elles sont souvent désignées sous le nom de *Spirulina* dans la littérature.

Cependant les souches peuvent varier en fonction des facteurs environnementaux, principalement la température, les conditions physiques et le milieu de culture (facteurs affectant la géométrie de l'hélice) et peuvent être classés comme suit :

- Les souches spiralées : caractérisées par des filaments en forme de queue de cochon, comme le type "lonar" en provenance d'Inde.
- Les souches ondulées : présentant des filaments en spirale étirée, telles que le type "paracas" originaire du Pérou.
- Les souches droites : avec des filaments très étirés, donnant l'impression d'être rectilignes, comme le type M2 (Menal et al., 2021).

6. Morphologie et caractères généraux

La spiruline est une micro-algue uni ou multicellulaire et filamentaire. C'est une cyanobactérie bleu-vert grâce à sa structure procaryote classée parmi les bactéries Gram négatif, elle possède une membrane pluristratifiée de 4 couches (Abert Vian, 2021; Menal et al., 2021). Elle se caractérise également par des filaments constitués de cellules transparentes alignées en série. Ces filaments, appelés trichomes, sont mobiles et non ramifiés, prenant une forme hélicoïdale uniquement en milieu liquide (Abert Vian, 2021).

Le terme "spiruline" dérive de la configuration enroulée et hélicoïdale de ces filaments ; en latin, "spira" signifie enroulement. Avec une longueur moyenne d'environ 250 µm et un diamètre de 10 à 12 µm, ces filaments s'enroulent généralement en 6 ou 7 spires (Abert Vian, 2021) et prennent une forme hélicoïdale uniquement quand l'environnement est favorable (liquide ou milieu de culture) (Menal et al., 2021). Cette structure en spirale caractéristique confère à la spiruline l'apparence d'un minuscule ressort, lui permettant de se déplacer dans l'eau en adoptant un mouvement semblable à celui d'une vis, à une vitesse de 5 µm/s (Abert Vian, 2021).

Par ailleurs, lorsque la température devient trop élevée, atteignant environ 70°C sur les rochers chauds des régions tropicales ou désertiques, la spiruline entre en état de dormance et cesse de se reproduire. Les filaments adoptent alors des formes irrégulières, parfois linéaires.

Sa couleur habituelle, qui est normalement bleu-vert, devient nacré et blanche. De plus, la spiruline développe un goût sucré, attribué à la transformation des protéines en polysaccharides sous l'effet de la chaleur (Menal et al., 2021).

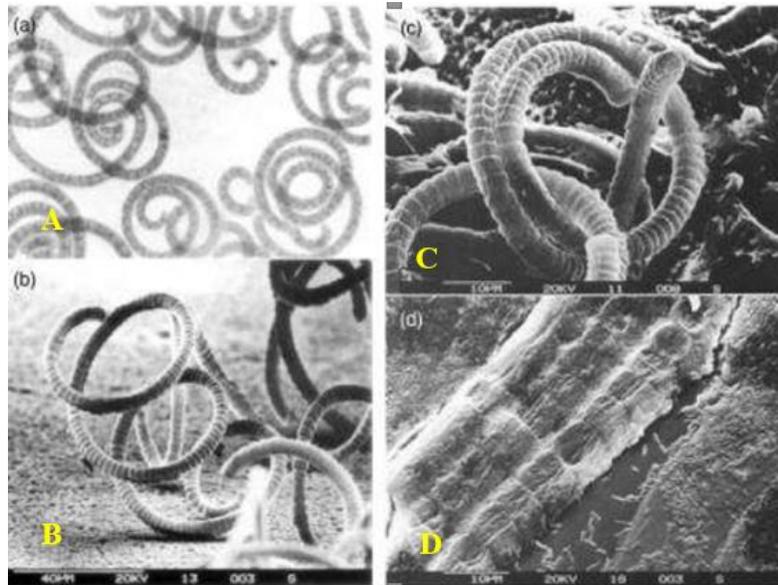


Figure 3. Morphologie de la spiruline : (A) sous microscope optique ;(B) Micrographie électronique d'*Arthrospira platensis*;(C) Micrographie électronique d'un trichome d'*Arthrospira platensis*;(D) Micrographie électronique

7. Répartition géographique naturelle

À l'état naturel, la spiruline se trouve principalement dans les lacs situés dans la ceinture intertropicale autour de la planète. Ces lacs sont généralement localisés entre environ 35° de latitude Nord et 35° de latitude Sud. Ils se caractérisent par leur faible profondeur et sont souvent balayés par de doux vents (Djaghoubi, 2013). Elle se trouve communément dans des eaux saumâtres, ainsi que dans des lacs salins à pH fortement alcalin. Selon son lieu d'origine, la spiruline présente diverses variations inter espèces. Voici quelques sites où la spiruline a été identifiée (Fig.4) (Sguera, 2008).

AFRIQUE	
Algérie	Tamanrasset
Tchad	Région du Kanem : lacs Latir, Ouna, Borkou, Katam, Yoan, Leyla, Bodou, Rombou, Moro, Mombolo, Liwa, Iseirom, 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	<i>non précisé</i>
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 Quillotoa : cratère de 1km de diamètre
AMERIQUE DU NORD	
Californie	Oakland ; Del Mar Beach
Haïti	Lac Gonâve
République Dominicaine	Lac Enriquillo
EUROPE	
Hongrie	<i>non précisé</i>
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, Chalviri, Salar de Uyuni
Chili	Aguas Calientes, Lagunas Brava, lac Vilama, Salar de Surire
Mauritanie	Côte sud
Inde	Rann of Kutch ; Gujarat
Madagascar	Côte Ouest

Figure 4. Distribution géographique naturelle de *Spirulina platensis*.

8. Reproduction

Elle se reproduit par bipartition par scission simple, un processus asexué où les filaments se segmentent, à ne pas confondre avec la mitose propre aux eucaryotes (Cruchot, 2008). Les filaments matures de spiruline développent des cellules spéciales appelées nécriides, qui se distinguent des autres cellules par leur forme biconcave et sont considérées comme des disques de séparation. À partir de ces disques, le trichome se fragmente pour donner naissance à de nouveaux filaments constitués de 2 à 4 cellules, appelés hormogonies. Les hormogonies s'allongent par division binaire pour former la forme hélicoïdale typique (Fig.5) (Menal et al., 2021). Sa multiplication s'accélère à des températures dépassant les 30°C à l'ombre ; dans des conditions propices, son temps de génération est très bref (7 heures). Les filaments microscopiques prolifèrent simultanément, formant des agrégats souvent appelés "fleurs d'eau" ou "blooms" (Cruchot, 2008).

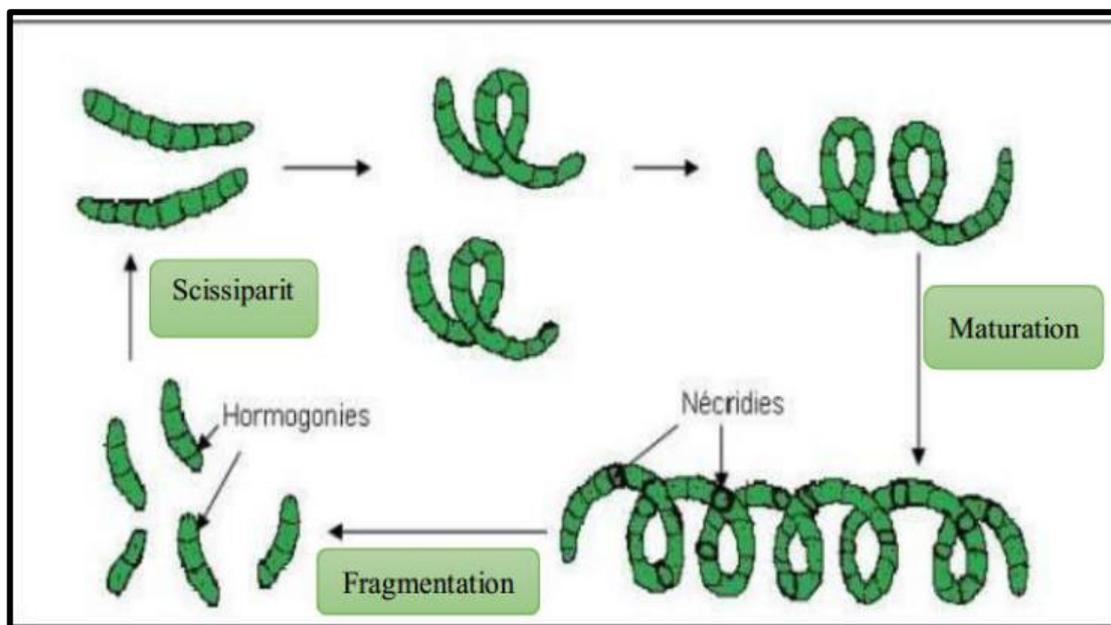


Figure 5. Cycle biologique de La spiruline.

9. Génome

Un consortium basé à Genève, regroupant plusieurs entités telles qu'Antenna Technologies, Biorigin SA, Fasteris (deux entreprises privées) et Hepia, a dirigé le projet de séquençage du génome d'*Arthrospira platensis*. Cette cartographie génétique de la spiruline a été enregistrée dans la base de données GenBank®, où toutes les séquences d'ADN sont accessibles au public. L'objectif de cet enregistrement à la GenBank® est de prévenir le brevetage de la spiruline. Depuis lors, les génomes de sept souches d'*Arthrospira* ont été entièrement

séquencés : *Arthrospira* sp. PCC8005, *A. platensis* NIES-39, *A. platensis* C1, *A. maxima* CS-328, *A. platensis* Paraca PO (WGS), *A. platensis* YZ et *Arthrospira* sp. TJSD091(Ahounou, 2018).

10. Ecologie

Le genre *Arthrospira* se distingue des autres cyanobactéries par son habitat naturel très particulier. Les spirulines prospèrent dans des eaux extrêmement minéralisées, alcalines et chaudes, des conditions environnementales qui limitent la présence d'autres organismes. Leur développement contribue à renforcer cet effet d'exclusion de plusieurs manières :

- En augmentant l'alcalinité de leur milieu, en consommant les carbonates et bicarbonates de son milieu ;
- En formant un écran qui bloque la lumière solaire pour d'autres algues, et cela par ses filaments pigmentés et flottants ;
- En sécrétant des substances antibactériennes.

Par ailleurs, les flamants nains *Phoeniconaias minor* ont été des vecteurs aériens pour la spiruline, transportant involontairement ces microorganismes vers de nouveaux habitats(Cruchot, 2008).

11. Composition de la spiruline

La composition de la spiruline varie considérablement en raison de plusieurs facteurs. Ces divergences sont attribuées à la diversité des souches de spiruline, à leur origine géographique, aux conditions de production telles que les éléments chimiques présents dans le milieu de culture, les techniques de séchage, de broyage et de récolte, ainsi qu'au taux d'ensoleillement. En conséquence, les différentes spirulines disponibles sur le marché mondial ne sont pas strictement équivalentes en termes de composition biochimique(Ahounou, 2018; Cruchot, 2008).

11.1 Protéines

Fondamentales pour la vie, les protéines représentent les molécules organiques prédominantes dans l'organisme humain. Elles jouent un rôle essentiel dans la structure et la composition chimique des individus, se présentant sous forme d'enzymes, d'hormones et d'anticorps. Elles participent à la réparation des tissus et sont cruciales pour maintenir l'équilibre acido-basique(Arbaoui & Bourdjiba, 2022; Menal et al., 2021).

La teneur en protéines d'*Arthrospira platensis* peut varier de 55 à 70 % du poids sec en fonction des souches et des conditions de culture (Sguera, 2008).

La Spiruline offre une combinaison intéressante et directement assimilable des huit acides aminés essentiels (**Fig.6**). Sa teneur en protéines dépasse de loin celle observée dans le poisson (25%), le soja (35%), la poudre de lait (35%) et les céréales (14%)(Menal et al., 2021).

Acides Aminés (AA)	Teneur moyenne dans 10g de spiruline	Principales fonctions
Isoleucine	350 mg (50% des AJR)	Indispensable dans le processus de croissance
Leucine	540 mg (49% des AJR)	Stimule les fonctions cérébrales
Lysine	290 mg (36% des AJR)	Production d'Anti corps, d'enzymes, d'hormones
Méthionine	140 mg (23% des AJR)	Antioxydant puissant
Phénylalanine	280 mg (140% des AJR)	Indispensable à la thyroïde
Thréonine	320 mg (64% des AJR)	Améliore la fonction digestive et intestinale
Tryptophane	100 mg (48% des AJR)	Contribue à la synthèse de sérotonine
Valine	400 mg (44% des AJR)	Stimule les capacités mentales et physiques

Figure 6. Teneur moyenne et principales fonctions des acides aminés essentiels de la spiruline.

De plus, la façon dont les protéines ingérées sont utilisées dépend de leur digestibilité, c'est-à-dire de la quantité d'azote protéique réellement assimilée par l'organisme. Contrairement à d'autres micro-organismes utilisés comme sources de protéines, tels que les levures ou les chlorelles, la spiruline ne possède pas de paroi cellulosique. Ainsi, elle présente l'énorme avantage d'être parfaitement digestible sans nécessiter de cuisson ou d'autres traitements visant à rendre ses protéines accessibles. Sa digestibilité est estimée à 83 % (Cruchot, 2008).

Par ailleurs, la spiruline renferme une concentration significative de phycobiliprotéines, des pigments colorés qui jouent un rôle crucial dans le processus de photosynthèse. Ces phycobiliprotéines sont classées en trois groupes : la phycoérythrine, l'allophycocyanine et la phycocyanine (Ahounou, 2018).

11.2 Lipides

En plus de leur rôle énergétique évident, les lipides jouent également un rôle structural important en contribuant au maintien de l'architecture cellulaire. Selon la méthode d'extraction utilisée, la teneur totale en lipides varie généralement entre 5 et 10 % du poids sec de la

spiruline. Cette fraction lipidique se caractérise par un équilibre satisfaisant entre les acides gras saturés et les acides gras polyinsaturés. Environ 83 % des lipides sont de la fraction saponifiable, tandis que les 17 % restants sont de la fraction insaponifiable (Ahounou, 2018; Djaghoubi, 2013).

La spiruline est une source riche en acides gras essentiels, principalement des acides gras polyinsaturés à 18 atomes de carbone, notamment de la série oméga-6 ($\omega 6$). Elle contient également de l'acide gamma-linoléique (18 :3 $\omega 6$), qui est l'un des meilleurs après le lait maternel et certaines huiles végétales précieuses. En plus de l'acide gamma-linoléique, on trouve d'autres acides gras essentiels comme l'acide linoléique (18 :2 $\omega 6$) et un pourcentage élevé d'acide palmitique (un acide gras saturé). Les acides gras oméga-3 et oméga-6 présents dans la spiruline peuvent aider à prévenir l'accumulation de cholestérol dans l'organisme, ce qui pourrait expliquer en partie les effets observés sur les taux de cholestérol et de triglycérides dans certaines études (Arbaoui & Bourdjiba, 2022).

La fraction insaponifiable de la spiruline est composée de stérols, de terpènes, de paraffines et de pigments. La quantité de stérols, y compris le cholestérol, retrouvée dans la spiruline est très faible, variant entre 0 et 0,015% de son poids sec. Les alcools terpéniques représentent environ 5 à 10% de la fraction insaponifiable. Enfin, les hydrocarbures saturés (paraffines) sont présents en quantités moindres, représentant entre 0,1 et 0,3% de la spiruline sèche, principalement du n-heptadécane, qui peut être toxique dans certaines conditions (Ahounou, 2018).

11.3 Glucides

Les glucides constituent 15 à 25% de la matière sèche des spirulines. Les glucides simples, tels que le fructose, le glucose et le saccharose, ainsi que des substances telles que le glycérol, le mannitol et le sorbitol, sont présents en faible quantité, ce qui fait de la spiruline un aliment peu calorique. Deux substances glucidiques importantes sont le méso-inositol phosphate, une excellente source de phosphore, et le calcium-spirulan, un polysaccharide composé de divers sucres et de calcium, qui a fait l'objet de recherches approfondies (Menal et al., 2021).

11.4 Acides nucléiques

Chez *Spirulina platensis*, les valeurs rapportées pour les acides nucléiques totaux dans la matière sèche varient entre 4,2 et 6 % (Sguera, 2008). Cette fraction correspond aux taux d'ADN (30%) et d'ARN (70%) présents dans la spiruline (Ahounou, 2018).

11.5 Vitamines

La Spiruline est une algue riche en vitamines, se classant comme la deuxième source de vitamine B1 après la levure de bière. De plus, elle présente une concentration notable de provitamine A, de vitamine B12 et de β -carotène (Djaghoubi, 2013). Au fait, il existe 13 vitamines, 4 liposolubles (A, D, E, K) et 9 hydrosolubles (B1, B2, B5, B6, B12, C, PP). La spiruline contient de nombreuses d'entre elles et spécialement des vitamines B (Sguera, 2008).

Tableau 4. Teneur moyenne et principales fonctions des vitamines liposolubles de la spiruline.

Vitamines liposolubles	Teneur moyenne dans 10g de spiruline	Principales fonctions
A (provitamine A)	15 à 24 mg (1000% des AJR)	Croissance, Vision, Antioxydant.
D	1200 UI	Minéralisation des os Absorption intestinale du calcium et stabilité de son taux.
E	1 UI (3% des AJR) : 0.5 à 1.9 mg	Antioxydant : membrane et lipoprotéine.
K	0.2 mg (300% des AJR)	Coagulation sanguine Fixation du calcium.

Tableau 5. Teneur moyenne et principales fonctions des vitamines hydrosolubles de la spiruline.

Vitamines hydrosolubles	Teneur moyenne dans 10g de spiruline	Principales fonctions
B1 (thiamine)	0.35 mg (30% des AJR)	-Transmission influx nerveux ; -Métabolisme des glucides.
B2 (riboflavine)	0.35 mg (21% des AJR)	-Production d'énergie par le métabolisme des glucides et lipides ; -Croissance des tissus (peau et muqueuses) ; -Vision.
B3 (niacine, PP)	1.46 mg (9% des AJR)	-Production d'énergie ; -Transmission de l'influx nerveux.
B5 (panthoténate)	0.5-10mg (10% des AJR)	-Croissance des tissus (peau, cheveux,

		muqueuses) ; -Favorise la production d'énergie.
B6 (pyridoxine)	0.08 mg (5% des AJR)	-Synthèse des neurotransmetteurs ; -Métabolisme des protéines.
B8 (biotine)	0.5 µg (0.5% des AJR)	-Métabolisme : protéines, lipides, glucides -Synthèse des vitamines B9 et B12.
B9 (acide folique)	0.01 mg (2.5 % des AJR)	-Renouvellement de toutes les cellules ; -Synthèse des neuromédiateurs.
B12 (Cobalamine)	0.015-0.032 (1000% des AJR)	-Formation des Globules rouges (anti anémique) ; -Renouvellement cellulaire.

11.6 Minéraux et oligoéléments

Les minéraux les plus significatifs présents dans la spiruline comprennent le calcium, le magnésium, le phosphore et le potassium. Leur présence dans la spiruline est comparable à celle que l'on trouve dans le lait (Djaghoubi, 2013). Sans oublier le fer, à titre de comparaison, les céréales classées comme la meilleure source de fer ne contiennent que 150 à 250 mg / kg, contre 600 mg/Kg pour la spiruline. Ce pourcentage peut être décuplé dix fois par enrichissement spécifique de milieu. Donc la spiruline pourrait représenter une source adéquate de fer (Arbaoui & Bourdjiba, 2022). De plus, la spiruline est également riche en oligo-éléments tels que le fer, le zinc et le sélénium, qui revêtent un intérêt nutritionnel considérable (Cruchot, 2008).

Tableau 6. Teneur moyenne et principales fonctions des minéraux et des oligoéléments de la spiruline.

Minéraux et Oligoéléments	Teneur moyenne dans 10g de spiruline	Principales fonctions
Calcium	130 mg (10% des AJR)	-Édification et renouvellement du squelette ; -Rythme cardiaque, système nerveux.
Phosphore	67 mg (8 % des AJR)	-Masse minérale du squelette osseux ; -Réactions biochimiques de l'organisme.
Fer	7-18 mg (50 à 100% des AJR)	-Fabrication et fonctionnement de l'hémoglobine ; -Constitution de myoglobine.
Zinc	0.4 mg (4% des AJR)	-Activation de plus de 200 enzymes.
Magnésium	25-50 mg (9 à 25% des AJR)	- Masse minérale du squelette osseux ;

		-Métabolisme glucidique et lipidique (muscle, coeur, axe nerveux)
Potassium	100-200 mg (5-10% des AJR)	- Perméabilité des membranes ; - Régulation du rythme cardiaque.
Sodium	0.09 mg	-Régulation pression osmotique ; -Maintien de l'équilibre hydro-électrolytique et de la masse hydrique.
Sélénium	0.1-2.55 mg (20-100% des AJR)	-Cofacteur des enzymes anti oxydantes - Stimulant de l'immunité.
Cuivre	0.1mg (5% des AJR)	-Cofacteur de nombreuses enzymes ; -Anti-inflammatoire, antioxydant.
Manganèse	0.4 mg (12% des AJR)	-Formations des os et des enzymes ; -Métabolisme protéines, lipides, glucides ; -Stabilise taux de glucose sanguin.
Chrome	0.03-0.25 mg (16% des AJR)	-Métabolisme glucides, lipides, acides nucléiques, cholestérol.

11.7 Pigments

La spiruline, souvent décrite comme une algue bleue mais visuellement verte, joue un rôle crucial dans la coloration des plumes des flamants, leur donnant leur teinte rose distinctive. Elle renferme une gamme variée de pigments, comprenant des chlorophylles telles que la chlorophylle a (caractéristique des plantes), des caroténoïdes, principalement le β -carotène, ainsi que des phycobiliprotéines telles que la phycocyanine et la phycoérythrine (Menal et al., 2021).

Par ailleurs, la concentration en pigments de la spiruline peut fluctuer en fonction des souches utilisées et des conditions de culture. Ces pigments lui permettent d'absorber différentes longueurs d'onde du spectre solaire et de les convertir en énergie et sont responsables des multiples propriétés attribuées à la spiruline. Voici une synthèse des pigments présents dans la spiruline, regroupés dans le tableau ci-dessous (Arbaoui & Bourdjiba, 2022):

Tableau 7. Teneur moyenne et principales fonctions des pigments de la spiruline.

Pigments	Teneur moyenne dans 10g de spiruline	Principales fonctions
Caroténoïdes : - Lutéine -Zéaxanthine -β-carotène	0,2 mg 11 mg 15à 24 mg (1000% des AJR)	-Vision ; - Vision ; -Croissance, Vision, Antioxydant
Chlorophylle	60 mg	-Chélateur des métaux lourds ; -Protecteur digestif.
Phycocyanine	100-160 mg	-Antioxydant, anti-inflammatoire ; -Immunostimulant, anti tumoral.

11.8 Enzymes

Les enzymes, des protéines synthétisées naturellement par l'organisme, jouent un rôle crucial en catalysant diverses réactions chimiques. La spiruline contient plusieurs enzymes, parmi lesquelles la superoxy de dismutase (SOD) occupe une place prépondérante, avec des concentrations allant de 1 000 à 4 000 UI/g. La SOD est une enzyme dotée d'une forte activité antioxydant, agissant dans la protection de l'organisme contre les dommages causés par les radicaux libres (Arbaoui & Bourdjiba, 2022; Menal et al., 2021).

12. Principales applications de la spiruline

12.1 En alimentation humaine

- **Combat de la malnutrition** : La spiruline est utilisée pour lutter contre la malnutrition, en particulier chez les enfants, grâce à sa capacité à pallier les carences et à traiter les effets des maladies provoquées par la famine.
- **Amélioration des performances sportives** : les sportifs bénéficient de la spiruline pour faciliter l'effort et favoriser une meilleure récupération.
- **Adaptation aux besoins spécifiques** : la spiruline est une excellente source de vitamines B9 et B12 ainsi que de fer.

- **Convient aux enfants et adolescents** : sa composition et sa haute assimilabilité la rendent idéale pour les enfants et les adolescents ainsi qu'au bébé.
- **Complément alimentaire** : utilisée comme complément protéique, la spiruline agit comme un coupe-faim, elle réduit l'appétit et optimise l'apport énergétique.
- **Utilisation en agroalimentaire** : Dans l'industrie agroalimentaire, la spiruline est utilisée comme colorant naturel en raison de la présence de la phycocyanine, l'un des rares pigments naturels de couleur bleue. Elle est intégrée dans divers produits tels que les chewing-gums, les sorbets, les sucreries, les produits laitiers et les boissons non alcoolisées. De plus, elle est incorporée dans une variété de produits à base d'algues, comme le sel et les tagliatelles. Dans certaines régions comme la Suisse et le Japon, le pain à la spiruline est une tradition bien établie depuis longtemps (Bougoffa & Hamidi, 2020).

12.2 En alimentation animale

La spiruline renforce les défenses naturelles des animaux, soutient leur système immunitaire, combat certaines maladies et réduit le vieillissement et la fatigue. Les chiens, chats, poissons et chevaux en bénéficient particulièrement, cette dernière espèce l'utilisant couramment pendant la croissance, les compétitions ou la convalescence. Les éleveurs avisés de poules ajoutent également de la spiruline à leur alimentation, ce qui améliore la qualité de leurs œufs (Bougoffa & Hamidi, 2020).

12.3 En cosmétique

L'analyse exhaustive des composants de la spiruline a révélé une multitude d'actifs naturels, tels que des acides aminés, des oligo-éléments, des antioxydants, des minéraux, des vitamines, des acides nucléiques (éléments constitutifs de l'ADN), des protéines et des acides gras essentiels. Ces éléments bénéficient à ceux qui intègrent la spiruline dans leur alimentation, et certains laboratoires cosmétiques les ont inclus dans des crèmes, des shampoings et des sérums.

Grâce à ses propriétés antioxydantes, la spiruline améliore la souplesse et l'élasticité de la peau, retardant ainsi son vieillissement. De plus, elle renforce les ongles et les cheveux en leur apportant brillance et résistance grâce aux nutriments et oligo-éléments qu'elle contient.

Considérée comme un aliment "beauté" d'exception, la spiruline est désormais utilisée dans divers soins anti-âges inspirés de la mer, dans la préparation de produits pour les spas et les

thalassothérapies (masques pour le visage, enveloppements corporels), ainsi que dans des traitements capillaires et des soins des ongles. Elle est également employée en cataplasme et en enveloppement corporel, et comme soin revitalisant pour le corps ou masque minéralisant pour le visage(Lahoucine, 2019)

12.4 En thérapeutique

La remarquable valeur nutritionnelle de la spiruline engendre une multitude d'applications thérapeutiques, parmi lesquelles figurent :

- Le traitement des carences nutritionnelles telles que la malnutrition protéino-énergétique, l'anémie ferriprive et l'hypovitaminose ;
- Le renforcement des défenses immunitaires, offrant ainsi une opportunité de lutte contre les maladies opportunistes ;
- Le traitement de certaines affections dermatologiques ;
- Son efficacité comme partenaire dans le soulagement des douleurs rhumatismales et de l'arthrose, la lutte contre l'ostéoporose, la réduction du cholestérol élevé, la gestion de l'hypertension et des allergies. De plus, elle protège le cœur et pourrait favoriser la régénération des cellules cérébrales (Lahoucine, 2019).

13. Culture de la spiruline

La spiruline se développe naturellement dans les eaux salées et les lacs légèrement salins, prospérant dans des environnements chauds, doux et alcalins. Elle peut être cultivée dans des conditions naturelles, semi-naturelles ou dans des environnements contrôlés, notamment dans des photobioréacteurs où le milieu de culture est synthétisé(Bougoffa& Hamidi, 2020).

13.1 Milieu de la culture

C'est une reconstitution artificielle du milieu naturel dans lequel la spiruline se développe. Cette solution est alcaline et riche en minéraux, composée d'un mélange d'eau et de sels minéraux, fournissant à la spiruline tous les éléments chimiques dont elle a besoin, tels que l'azote (N), le phosphore (P) et le potassium (K). Le Tableau ci-dessous présente la composition chimique d'un milieu de culture typique(Ferhat &Lakehal, 2019).

Tableau 8. La composition chimique d'un milieu de culture typique pour la spiruline.

Eléments	Concentration en mg /l
Bicarbonate	2800
Phosphate	614
Sulfate	25
Chlore	350
Sodium	3030
Potassium	4380
Magnésium	642
Calcium	10
Ammonium	5
Ammoniac	5
Fer	1

13.2 Conditions de la culture

Trois facteurs clés influent sur la culture de la spiruline : la température, la lumière et le pH. La température optimale pour la croissance de la spiruline se situe autour de 37°C. Des températures au-dessus de 40°C sont néfastes et peuvent conduire à sa mort, tandis qu'à 20°C, sa croissance est pratiquement nulle. En ce qui concerne la lumière, il est essentiel de maintenir un éclairage adéquat pour favoriser la photosynthèse. Pour cela, il est recommandé d'ensemencer le bassin avec suffisamment d'algues pour empêcher la lumière d'atteindre le fond du bassin. De plus, une agitation régulière de la culture est nécessaire pour éviter que les filaments ne restent trop longtemps à la surface en plein soleil.

Le pH optimal pour la culture de la spiruline se situe entre 8,5 et 10,5. Naturellement, la spiruline a tendance à alcaliniser le milieu en libérant des ions carbonates qui hydrolysent pour libérer des ions OH⁻. D'autres facteurs tels que la salinité et l'agitation du milieu sont également importants, bien que moins cruciaux (Ferhat & Lakehal, 2019).

14. Production de la spiruline

La spiruline est largement produite dans de nombreux pays répartis sur quatre continents : l'Afrique, l'Asie, les Amériques et l'Europe. Les approches de production varient selon les

particularités climatiques et les ressources disponibles dans chaque région, ce qui se traduit par une grande diversité dans les installations utilisées pour cultiver cette algue. Selon l'étendue des bassins et le niveau de technologie mis en œuvre, deux principaux modes de production se distinguent : la culture artisanale et la culture industrielle (Ferhat & Lakehal, 2019).

Tableau 9. Différentes productions de spiruline et leurs caractéristiques.

	Artisanale	Semi industrielle	Industrielle
Taille des bassins	< 100 m ²	200 – 1000 m ²	1000 m ² – 5000 m ²
Surface totale exploitée	< 3000 m ²	3000 m – 1 hectare	Plusieurs hectares
Capacité de production	< 200 kg	10 – 50 tonnes	50 – >500 tonnes

Source : (Bougoffa & Hamidi, 2020).

14.1 Production artisanale

Cette méthode implique la construction de bassins et d'un réservoir en béton à proximité d'un lac. Le processus commence par le remplissage du réservoir avec de l'eau pompée du lac, qui est ensuite acheminée par gravité à travers un filtre à sable avant d'atteindre les bassins de culture de spiruline. Ce système permet de produire une spiruline de haute qualité destinée à la consommation humaine, grâce à une filtration avec un filtre de 50 µm avant l'arrivée dans les bassins. Parallèlement, il permet également de récolter des algues moins pures (filtrées avec un filtre de 150 µm), utilisables dans l'aviculture ou l'aquaculture (Ferhat & Lakehal, 2019).

14.2 Production industrielle

La culture de la spiruline se déroule dans des bassins de formes variées, souvent de grande surface (plusieurs hectares), et est agitée mécaniquement. Une fois récoltée, la spiruline est séchée par atomisation. Bien que l'investissement initial soit important, les rendements peuvent atteindre des centaines de tonnes (Ferhat & Lakehal, 2019).

15. Toxicité

La spiruline est non toxique car elle ne possède pas les gènes responsables de la synthèse des toxines présentes chez certaines cyanobactéries. De plus, le milieu très alcalin dans lequel elle se développe inhibe la croissance d'organismes contaminants et ne leur permet pas de

proliférer. À ce jour, aucun cas avéré d'intoxication liée à la consommation de spiruline n'a été rapporté (Ferhat & Lakehal, 2019).

En effet, cela a été confirmé par l'étude de (Hutadilok-Towatana et al., 2008), qui ont conclu aucun signe de toxicité dans les 7 jours « traitement à court terme » suivant l'alimentation de souris suisses mâles à la dose élevée de 30 et 10 g/kg de poids corporel de *S. platensis* frais et séché. Aussi, dans une autre expérience ou quatre groupes de six rats mâles et femelles ont reçus quotidiennement pendant 12 semaines « traitement à long terme » des algues fraîches ou séchées à différentes doses, le résultat été le même c'est à dire que la consommation d'algues n'a montré aucun effet sur le comportement, la consommation de nourriture et d'eau, la croissance ou l'état de santé de ces animaux pendant le déroulement de cette enquête. Les valeurs en chimie clinique surveillées tout au long de la période d'étude n'ont pas révélé de différences significatives entre les groupes témoins et traités.

Par ailleurs, concernant la santé humaine, les scientifiques recommandent des contrôles réguliers des niveaux de métaux lourds dans la spiruline destinée à la consommation humaine car elle a la capacité d'accumuler des métaux lourds, mais généralement en quantités inférieures aux seuils de toxicité établis par la FAO (Ferhat & Lakehal, 2019). Selon Tabutin et al. (2002) le risque micro biologique est lié à la présence de microorganismes ou de substances élaborées par les microorganismes.

Ce risque résulte souvent d'une maîtrise insuffisante des conditions d'hygiène au cours de la production, du stockage, du transport ou de la commercialisation des produits. Pour les algues en sachet les critères micro biologiques suivants :

- Germes aérobies mésophiles à 30°C \leq 100 000/g ;
- *Clostridium perfringens* \leq 1/g ;
- Coliformes fécaux à 44.5°C \leq 10/g ;
- *Staphylococcus aureus* \leq 100/g ;
- Anaérobies sulfite-réducteurs à 46°C \leq 100/g ;
- *Salmonella* absente dans 25 g.

CHAPITRE II : Matériel et méthodes

1. Matériels

1.1 Matériels biologique

Le matériel biologique utilisé dans notre travail est *Arthrospira platensis* qui s'appelle FOXBEHATAM et originaire de la région de Tamanrasset.



Figure 7. La souche de spiruline *Arthrospira platensis*

Matériels de culture (non biologique)

- Résistance aquarium
- Balance à précision
- PH mètre
- Microscope optique
- Thermomètre
- Verrerie (Bécher, Flacons, tubes à essai...)
- Spectrométrie
- Agitateur.

2. Méthodes d'étude

2.1 Préparations de milieux de culture

Le milieu de culture utilisé dans l'expérience était fourni par Mr HIRI Abdelkader c'est un milieu adapté pour la culture de la spiruline. Les composants de milieu HIRI sont présentés dans le tableau suivant.

HIRI : Abdelkader HIRI est docteur en géophysique-géomagnétisme de l'université parisienne Pierre et Marie Curie (UPMC). En juin dernier, il a participé au Salon des Solidarités, à Paris, pour présenter la spiruline du Hoggar et l'association Sahara Spirulina qu'il a créée à Tamanrasset. Cette association a pour but d'assurer le développement et la promotion de cette algue microscopique aux propriétés nutritionnelles exceptionnelles. Une algue très à la mode mais connue et consommée au Sahara depuis des millénaires, en particulier au Tchad sous le nom de dihé.

Tableau 10. La composition de milieu HIRI.

Composant	Quantité g/l
Natron remplacer par du Carbonate et Bicarbonate de soude	16
Urée ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$)	1
Chlorure de Sodium (NaCl)	1
Phosphate d'Ammonium ($\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$	0.1
Sulfate de Magnésium (MgSO_4)	0.1
Sulfate de Potassium (K_2SO_4)	0.5
Chlorure de Calcium ($\text{CaCl}_2, 2\text{H}_2\text{O}$)	0.1
Sulfate de Fer (Fe_2SO_4)	0.01

Les éléments du milieu de culture sont placés dans 1,5 litre d'eau potable (leur pH=7) dans un erlenmeyer, puis ils sont mélangés avec un agitateur pour bien dissoudre les composants et on arrive à un pH basique de 9,67.

2.2 Ensemencement

L'ensemencement a été réalisée avec une proportion de 1/5 c'est à dire 5 volumes de milieu avec 1 volume de souche (méthode HIRI). La culture a démarré le 05/05/2024.

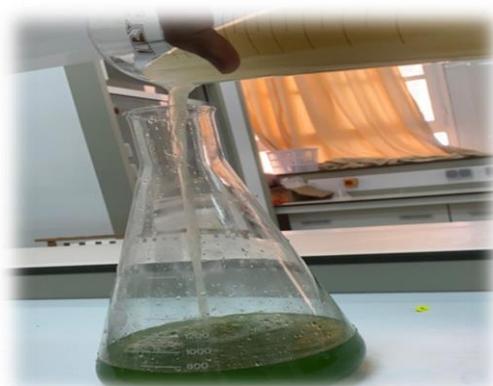


Figure 8. L'ensemencement

2.3 Les conditions de culture

a- Température

La température initiale de la culture était de 27,8°C puis on l'a réglé entre 30°C et 33°C.

b- pH

Le pH initial du milieu était de 9,73.

c- Eclairage

L'énergie lumineuse en nuit pour la culture est fournie par la lampe du laboratoire 24/24h.

d-Agitation

- La biomasse initiale : **0.6 g**

L'agitation est nécessaire pour permettre aux cellules l'accès aux nutriments et à la lumière, elle a été assurée par un agitateur qui nous avons actionné (24/24h) pendant toute la période de l'expérimentation.

3. Suivi la croissance d'*Arthrospira platensis*

Le contrôle de culture de Spiruline a été estimée par :

3.1 Mesure des paramètres physico-chimiques

Le contrôle du pH et de la température de la culture est nécessaire. Ce contrôle a été réalisé quotidiennement à l'aide d'un pH-mètre de paillasse lié avec une sonde pour la mesure de la température.



Figure 9. Mesure du pH et de la température.

3.2 Mesure de l'absorbance

On a mesuré la densité optique de la spiruline chaque jour pour estimer la concentration de la biomasse à l'aide d'un spectrophotomètre à une longueur d'onde de 560 nm pour la lecture.

3.3 Etude des caractéristiques de la spiruline

3.3.1 L'étude morphologique

a. L'observation macroscopique : on a observé le changement de couleur de la culture à la fin de l'expérimentation.

b. L'observation microscopique : la couleur et la forme peuvent varier en fonction des paramètres physiques et chimiques du milieu, l'observation a été réalisée à l'aide d'un microscope optique.

3.4 Analyse microbiologique

Selon la disponibilité des milieux de culture on a fait la recherche des germes suivants :

3.4.1 *Staphylococcus aureus*

a. Principe

Ensemencement en surface sur milieu gélosé sélectif «CHAPMAN », avec une quantité déterminée de la solution mère.

b. Mode opératoire

- À l'aide d'une pipette stérile, déposer 0,1 ml de la suspension mère, dans une boîte de milieu gélosé de CHAPMAN ;
- Étaler soigneusement l'inoculum à la surface de la boîte de milieu gélosé, en évitant de toucher les bords de la boîte de Pétri, à l'aide de pipette pasteur. Laisser sécher les boîtes, avec leur couvercle en place ;
- Placer les boîtes préparées dans l'étuve réglée à une température entre 34 °C et 38 °C Puis incuber pendant 24 h.

c. Lecture des résultats

Les colonies caractéristiques sont noires ou grises, brillantes et convexes de 1 mm à 1,5 mm de diamètre après 24 h d'incubation.

3.4.2 Les coliformes fécaux

a. Principe

Les coliformes se distinguent des autres entérobactéries par leurs aptitudes à fermenter le lactose, leurs détections consistent à incuber l'échantillon à 44°C pendant 24h à 48h dans le milieu « Violet Red Bile Lactose agar » (VRBL).

b. Mode opératoire

- À partir de solution mère et la dilution 10^{-1} porter 1ml dans des boites de Pétri vides préparées à cet usage et numérotées ;
- Compléter ensuite chaque boite avec 15ml de gélose (VRBL) préalablement fondue et refroidie ;
- Faire ensuite les mouvements circulaires et de va-et-vient en forme de « 8 » pour bien mélanger la gélose à l'inoculum ;
- Laisser les boites solidifier sur pailleasse ;
- Incuber les boites pendant 24 à 48h à 44°C pour la recherche des coliformes fécaux.

c. Lecture

Les coliformes fécaux apparaissent en masse sous forme des petites colonies de couleur rouge fonce, brillantes de 0,5mm de diamètre, dont le nombre est compris entre 30 et 300 colonies. n. Le résultat est exprimé en ou UFC/ml.

3.4.3 Spores de bactéries anaérobies sulfite réducteurs :

a. Principe

Cette méthode consiste en la recherche et le dénombrement des spores des bactéries Anaérobies Sulfite-Réductrices par incorporation en gélose en tubes profonds. Les microorganismes sulfite-réducteurs réduisent le sulfite de sodium en sulfure, provoquant avec le citrate ferrique un précipité noir de sulfure de fer autour des colonies.

b. Mode opératoire

- Transférer environ 1 ml pour l'échantillon de spiruline dans des tubes stériles, qui sera par la suite soumis à un chauffage de l'ordre de 80°C pendant 8 à 10 minutes, pour détruire toutes les formes végétatives des bactéries anaérobies sulfito-réductrices éventuellement présentes.
- Après chauffage, refroidir immédiatement les tubes destinés à l'analyse, sous l'eau de robinet - Ajouter environ 18 à 20 ml de gélose viande foie (VF) préalablement fondue puis refroidie à $47\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ et additionnée de ses additifs spécifiques soit une ampoule d'Alun de fer et une ampoule de sulfite de sodium.
- Mélanger doucement le milieu et l'inoculum en évitant d'introduire des bulles d'air et de l'oxygène.
- Laisser solidifier sur paillasse pendant environ 30 minutes, puis incuber à 37 °C pendant 24 à 48 heures.

c. Lecture des résultats

Dénombrer toute colonie noire de 0,5 mm de diamètre, ayant poussé en masse.

3.5 Récolte

La récolte de la spiruline a été faite à la fin de l'expérimentation, à l'aide d'un papier filtre et séchée à l'air libre, la biomasse obtenue est pesée par une balance électronique de précision.



Figure 10. Filtration et récolte

CHAPITRE III : Résultats et discussion

1. Evolution des paramètres physico-chimiques

1.1 Température

La courbe dans la figure illustre l'évolution de la température de la culture de spiruline pendant la durée d'expérimentation. La température initiale de la culture était de 27 °C, puis on observe une évolution pendant les 07 jours qui atteint une valeur de 34,8°C.

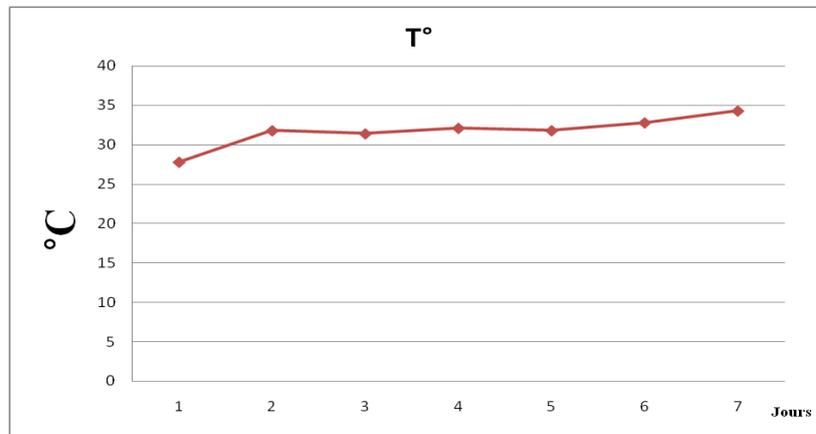


Figure 11. Evolution de la température du milieu de culture de la Spiruline durant 7 jours.

➤ Discussion

La spiruline, un micro-organisme thermophile, a une température de croissance optimale comprise entre 25 et 37°C selon **Richmond (1986)**, Nos résultats montrent que la température initiale de milieu de culture (27°C) était parfaitement adaptée à son développement. Cependant, des variations ont été observées au cours de l'expérience, avec une baisse à 26°C puis une hausse à 35°C. Ces fluctuations, bien que présentes, sont restées dans la plage de tolérance de la spiruline. Les régions sahariennes, caractérisées par des températures élevées et un fort ensoleillement, constituent un environnement particulièrement propice à la culture de cette microalgue.

1.2 pH

La courbe ci-dessous présente les valeurs de pH mesuré pendant les 7 jours de la culture. Le pH initial après ensemencement était 9,73, on observe une augmentation dans les valeurs, la valeur maximale obtenue dans l'expérience était 9,8.

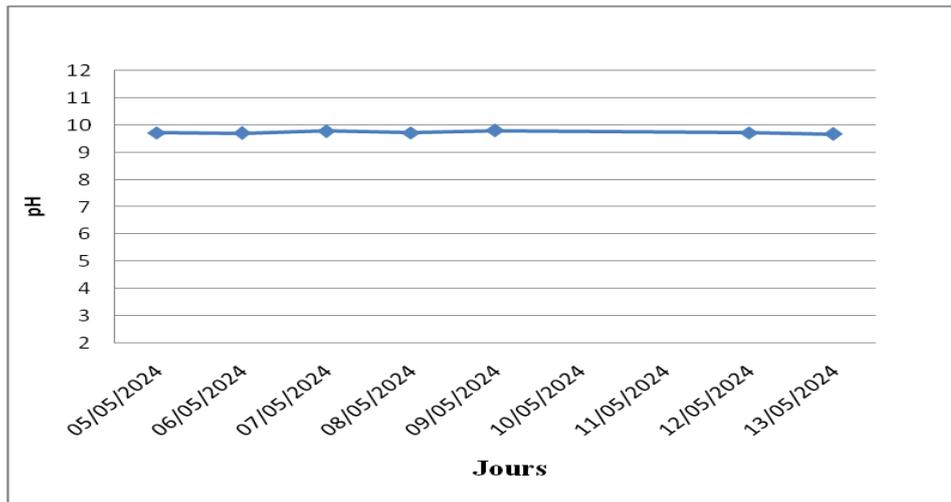


Figure 12. Evolution du pH dans le milieu de culture de Spiruline

➤ **Discussion**

La spiruline est un organisme alcalinophile, des pH légèrement supérieurs à 9,99 ne compromettent pas sa croissance, comme le suggèrent **Richmond et al. (1980)**. Le pH joue un rôle crucial dans le métabolisme de la spiruline : une diminution du pH peut indiquer une consommation de la source de carbone principale et, par conséquent, une diminution de l'activité photosynthétique. Ce phénomène peut être lié à des carences en nutriments essentiels comme les nitrates et les phosphates, entraînant la formation de grumeaux jaunes et inhibant la production de pigments photosynthétiques. Néanmoins, la spiruline possède des mécanismes physiologiques lui permettant de maintenir un gradient de pH interne favorable, même dans des conditions externes très alcalines, comme l'ont démontré **Krulwich et Guffanti (1989)**.

2. Evolution de la biomasse

Le graphique montre l'évolution des valeurs de l'absorbance de la spiruline à une longueur d'onde de 560nm en fonction de temps. On observe que la valeur de l'absorbance augmente progressivement au cours du temps jusqu'à 1.205.

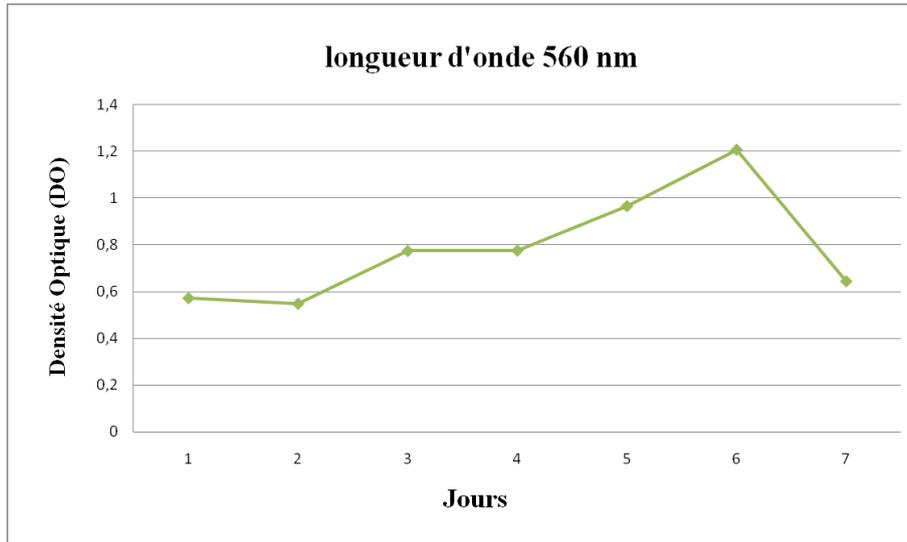


Figure 13. Evolution des valeurs de l'absorbance de la spiruline.

3. Les caractéristiques de la spiruline

a. Observation macroscopique

- Une odeur d'algue prononcée et la couleur de la culture il est vert foncé.
- La couleur de culture tourné au vert à partir du bleu-vert qui est caractéristique pour les cyanobactéries. Ce phénomène est dû à l'épuisement de l'azote dans le milieu de culture (Goksan et Zekryaoulu, 2007).

b. Observation microscopique

Après des observations microscopiques de la spiruline on a observé une forme de filament droite de couleur verte et fragmenté. La charge des filaments de la spiruline a augmenté progressivement au cours de la durée de l'expérience.

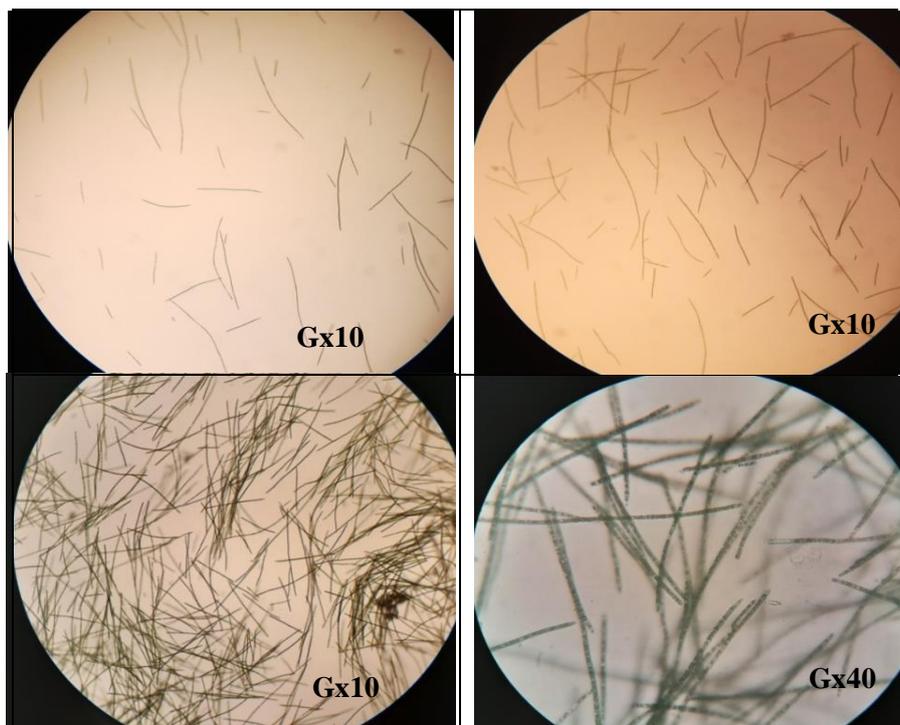
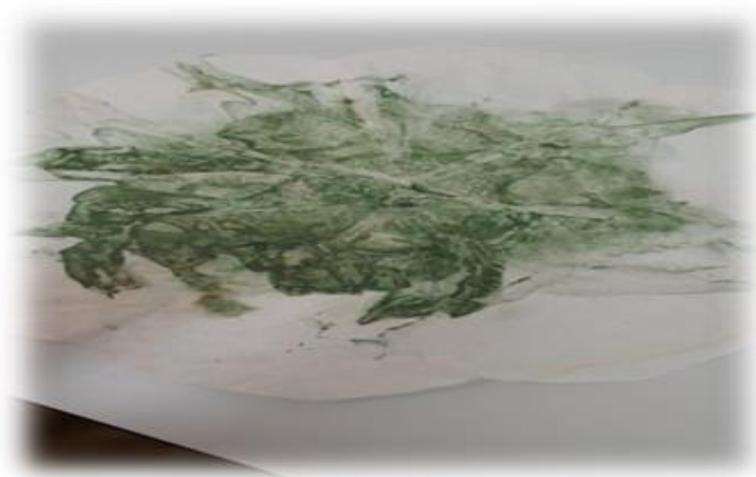


Figure 14. Observation microscopique de la spiruline

4. Récolte

La récolte a été faite à la fin de la durée expérimentation. Le poids de la biomasse obtenue est de 1.9 g.



5. Qualité microbiologique

Tableau 11. Résultat de contrôle microbiologique

Les germes recherchés	Les normes
Les coliformes fécaux	≤ 300
Les anaérobies sulfite réducteur	Négatif
Staphylococcus aureus	Négatif

D'après le tableau, les résultats des analyses sont conformes aux normes de qualité microbiologique pour les germes recherchés. Cela signifie que l'échantillon est microbiologiquement sain et qu'il ne présente pas de risque.

Conclusion

Conclusion

La spiruline n'a suscité l'intérêt des scientifiques que tardivement, elle jouit aujourd'hui d'un intérêt grandissant grâce à ses multiples propriétés thérapeutiques et nutritionnelles, elle 'est imposée comme un super aliment après des siècles de consommation. C'est ce qui a été démontré dans ce travail, nous sommes concentrés sur la description de tous les aspects biologiques d'*Arthrospira platensis*.

Le suivi de la croissance et la production de la spiruline a fait l'objectif de notre travail, les étapes sont résumées comme suit :

- Préparation de milieux de culture favorable et faire la culture de la spiruline.
- Suivi la croissance et les paramètres physico-chimique de la culture.
- Etude les caractérisations de la spiruline.

Les résultats obtenus montrent que la température et l'agitation, la lumière sont des facteurs très importants dans le développement de la spiruline même si le milieu est favorable et correctement alcalin ce qui s'est traduit par une faible production de la biomasse.

Et d'après notre expérience, le milieu de HIRI est considéré comme le meilleur milieu pour la croissance de l'*Arthrospira platensis* en fournissant toutes les conditions nécessaires à la croissance.

RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

Mémoires et thèses :

- **Ahounou, M. N. (2018).** *La spiruline : Un complément alimentaire en conseil à l'officine. Enquête d'utilisation* [Thèse de doctorat]. Université de Rouen- France.
- **Arbaoui, O., & Bourdjiba, R. (2022).** *Intérêt alimentaire et biotechnologique de la spiruline* [Mémoire de master]. Université 8 Mai 1945 Guelma – Algérie.
- **Bougoffa, S., & Hamidi, A. (2020).** *Etude de l'activité antibactérienne de l'extrait de la spiruline (Spirulinaplatensis) sur différentes souches pathogènes dans la région de Ouargla* [Mémoire de master]. Université KasdiMerbah de Ouargla- Algérie.
- **Cherguelaine, A., & Bouslimani, F. Z. (2011).** *Effet de l'association de probiotique et de spiruline sur le pouvoir acidifiant et la cinétique de croissance* [Mémoire de master]. Université Saad Dahleb Blida- Algérie.
- **Cruchot, H. (2008).** *La spiruline : Bilan et perspectives* [Thèse de doctorat]. Université de Franche-comté - France.
- **Djaghoubi, A. (2013).** *Impact de la salinité des eaux de la région de Ouargla sur le comportement de Spiruline « Arthrospiraplatensis » (Souche de Tamanrasset)* [Mémoire de master]. Université KasdiMerbah de Ouargla- Algérie.
- **Ferhat, W., & Lakehal, S. (2019).** *Culture et production de la spiruline Arthrospira platensis dans la région d'El 'Oued* [Mémoire de master]. Université Echahid Hamma Lakhdar D'El Oued-Algérie.
- **Hakkoum, H. (2018).** *Contribution à l'étude de la microflore fongique du sol dans deux stations de la région de Biskra* [Mémoire de master]. Université Mohamed Kheider– Biskra – Algérie.
- **Kaboul, A. (2016).** *Etude des croûtes biologiques des sols des zones arides (cas De la région d'Ouargla et la région de El'Oued)* [Mémoire de master]. Université KasdiMerbah Ouargla - Algérie.
- **Karabi, M. (2017).** *Fonctionnement microbiologique des sols oasiens. Cas de quelques sols de la région de Ouargla* [Thèse de doctorat]. Université KasdiMerbah Ouargla - Algérie.

- **Lahoucine, H. A. (2019).** *Etude de l'impact de l'incorporation de la Spiruline sur la qualité organoleptique et physicochimique de la Mayonnaise* [Mémoire de master]. Université Abdelhamid Ibn Badis-Mostaganem- Algérie.
- **Menal, Z., Taders, D., & Chergui, A. (2021).** *Etude sur les effets bénéfiques de la spiruline* [Mémoire de master]. Université Djilali Bounaâma de Khemis Miliana - Algérie.
- **Sguera, S. (2008).** *Spirulinaplatensis et ses constituants : Intérêts nutritionnels et activités thérapeutiques* [Thèse de doctorat]. Université Henri Poincaré - Nancy 1- France.

Articles :

- **Abomohra, A., El-Shouny, W., Sharaf, M., & Abo Eleneen, M. (2016).** Effect of Gamma Radiation on Growth and Metabolic Activities of *Arthrospira Platensis*. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 59. <https://doi.org/10.1590/1678-4324-2016150476>.
- **Arun, N., Gupta, S., & Singh, D. P. (2012).** Antimicrobial and antioxydant property of commonly found microalgae *Spirulina platensis*, *Nostoc muscorum* and *Chlorella pyrenoidosa* against some pathogenic bacteria and fungi. *Internaional Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, 3(12), 4866-4875.
- **Ayari-Guentri, S., DJEMOUAI, N., GACEB-TERRAK, R., & RAHMANIA, F. (2020).** Abondance et diversité de la mycoflore associée à *Hyoscyamusmuticus* L. subsp. *Falezlez* (Coss.) Maire ; une plante médicinale de la région d'Adrar. *Journal Algérien des Régions Arides (JARA)*, 14(1), 9.
- **Baicus, C., & Baicus, A. (2007).** *Spirulina* did not ameliorate idiopathic chronic fatigue in four N-of-1 randomized controlled trials. *PhytotherapyResearch : PTR*, 21(6), 570-573. <https://doi.org/10.1002/ptr.2114>.
- **Bazzine, M., & Belhadj, H.-A. (2014).** Etude des Croutes Biologiques de Quelques Sols Gypseux et Salins du Milieu Saharien : Cas de la Cuvette de Ouargla (Sahara Septentrional Est Algerien). *Algerian Journal of AridEnvironment*, 4(1), 45-52. <https://doi.org/10.12816/0008910>.

- **Doumandji, A., & Alili, D. (2012).** Effet *in vitro* de la spiruline sur l'évolution des bactéries lactiques thermophiles. *Agrobiologia*, 2, 67-74.
- **Hamouda Ali, I., & Doumandji, A. (2016).** Etude de l'influence *in vitro* de la spiruline sur la croissance des bifidobactéries. *Agrobiologia*, 6(1), 8.
- **Hayashi, K., Hayashi, T., Morita, N., & Kojima, I. (1993).** An extract from *Spirulina platensis* is a selective inhibitor of herpes simplex virus type 1 penetration into HeLa cells. *Phytotherapy Research*, 7(1), 76-80. <https://doi.org/10.1002/ptr.2650070118>.
- **Hayashi, T., Hayashi, K., Maeda, M., & Kojima, I. (1996).** Calcium Spirulan, an Inhibitor of Enveloped Virus Replication, from a Blue-Green Alga *Spirulina platensis*. *Journal of Natural Products*, 59(1), 83-87. <https://doi.org/10.1021/np960017o>.
- **Hoseini, S. M., Khosravi-Darani, K., & Mozafari, M. R. (2013).** Nutritional and Medical Applications of Spirulina Microalgae. *Mini-Reviews in Medicinal Chemistry*, 13(8), 1231-1237. <https://doi.org/10.2174/1389557511313080009>.
- **Hutadilok-Tawatana, N., Reanmongkol, W., Satitit, S., Panichayupakaranant, P., & Ritthisunthorn, P. (2008).** A Subchronic Toxicity Study of Spirulina platensis. *Food Science and Technology Research*, 14(4), 351-358. <https://doi.org/10.3136/fstr.14.351>.
- **Miranda, M. S., Cintra, R. G., Barros, S. B., & Mancini Filho, J. (1998).** Antioxidant activity of the microalga *Spirulina maxima*. *Brazilian Journal of Medical and Biological Research = Revista Brasileira De Pesquisas Medicas E Biologicas*, 31(8), 1075-1079. <https://doi.org/10.1590/s0100-879x1998000800007>.
- **Shao, W., Ebaid, R., El-Sheekh, M., Abomohra, A., & Eladel, H. (2019).** Pharmaceutical applications and consequent environmental impacts of *Spirulina* (*Arthrospira*): An overview. *Grasas y Aceites*, 70(1), Article 1. <https://doi.org/10.3989/gya.0690181>.

- **Subhashini, J., Mahipal, S. V. K., Reddy, M. C., Mallikarjuna Reddy, M., Rachamalla, A., & Reddanna, P. (2004).** Molecular mechanisms in C-Phycocyanin induced apoptosis in human chronic myeloid leukemia cell line-K562. *Biochemical Pharmacology*, 68(3), 453-462. <https://doi.org/10.1016/j.bcp.2004.02.025>*

Chapitre d'un livre :

- **Duponnois, R., Bâ, A. M., Prin, Y., Baudoin, E., Galiana, A., & Dreyfus, B. (2010).** Les champignons mycorrhiziens : Une composante majeure dans les processus biologiques régissant la stabilité et la productivité des écosystèmes forestiers tropicaux. Dans *Le projet majeur africain de la Grande Muraille Verte* (IRD Éditions, p. 421-440). IRD Éditions. <https://books.openedition.org/irdeditions/2161?lang=fr>.
- **Tabutin, I., Gouesin, P. Y., & Mollo, P. (2002, avril).** la spiruline contre la malnutrition. Madurai- Inde.
- **Goksan T, A et Zekruyaoulu, Ü. (2007).** The Growth of *Spirulina platensis* in Different Culture Systems Under Greenhouse Condition. *Turk J Biol*: 47-52
- **Richmond a., 1986.** Microalgae of economic potentials. In Richmond, A. (ed.) *Handbook of algal mass culture*, CRC Press, Florida. pp. 199-243.
- **Krulwich.T.A and Guffanti.A. A, 1989** Alkalophilic bacteria, *Annual Review of Microbiology*, Vol. 43, pp. 435-463.
- **Richmond a., (1988).** Spirulina. In : Borowitzka M. A., Borowitzka L. J.(Eds), *Microalgal Biotech*. Cambridge University Press, Cambridge, pp 85-121. Université de Toliara, Toliara Madagascar. 160 p.

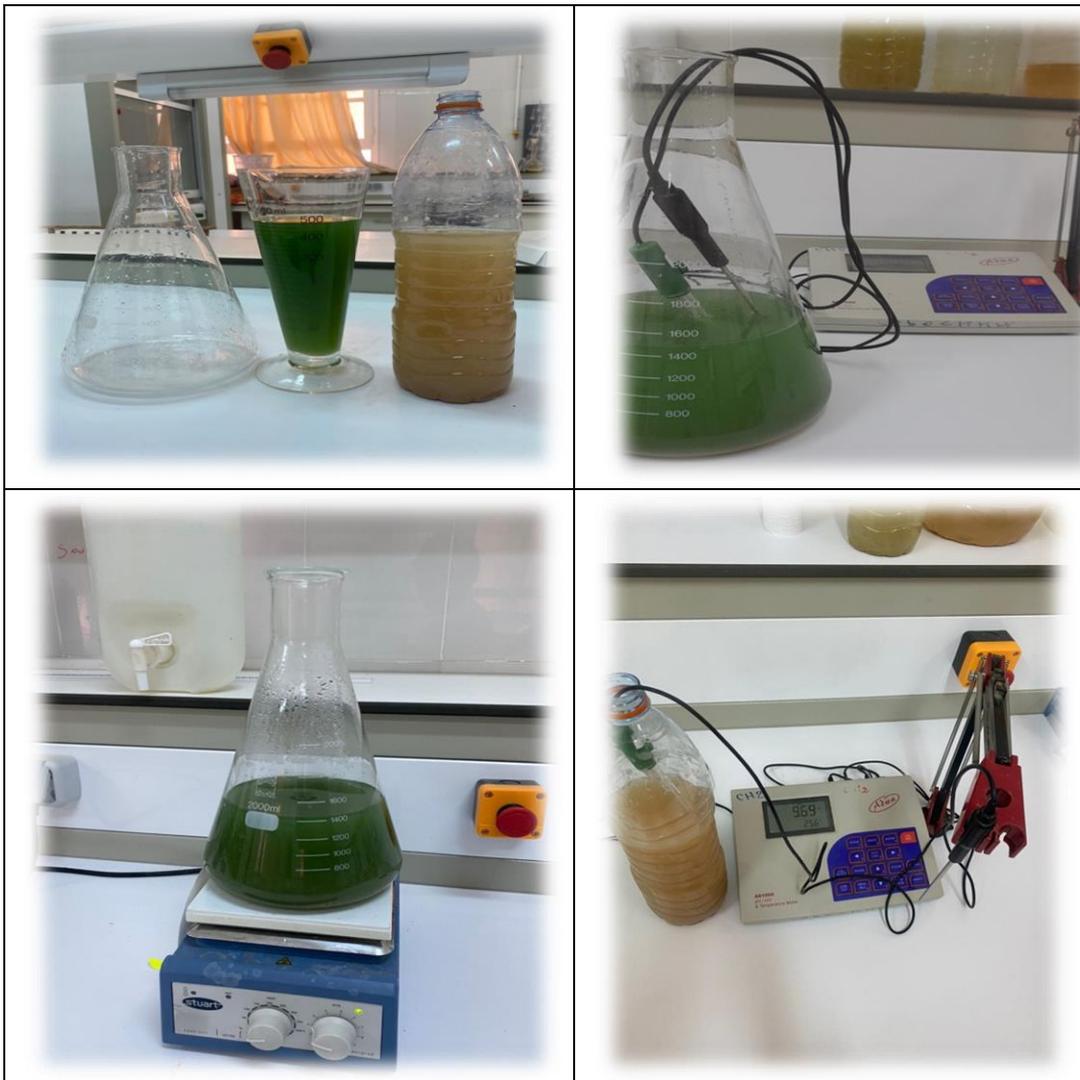
Documents en ligne :

- **Levesque, E., & Parise, F. (2019).** *Spiruline : Bienfaits et recettes d'un aliment incroyable*. <https://static.fnac-static.com/multimedia/editorial/pdf/9782317021718.pdf>.

Sites web :

- **Abert Vian, M. (2021, mars 10).** *Caractéristiques générales de la spiruline.* Techniques de l'Ingénieur. <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/procedes-chimie-bio-agro-th2/filiere-de-production-produits-d-origine-vegetale-42433210/spiruline-f6295/caracteristiques-generales-de-la-spiruline-f6295niv10002.html>.
- **CIUSSS MCQ. (2020).** *Algues bleues—Causes, Symptômes, effets sur la santé.* CIUSSS MCQ. <https://ciusssmcq.ca/conseils-sante/sante-et-environnement/algues-bleues/>.
- **Dihé, T. (2019, octobre 14).** *Les origines de la spiruline, cette micro-algue magique.* Dihé - Compléments alimentaires naturels. <https://www.dihe.fr/blog-superaliments/origines-de-la-spiruline.html>.
- **Eden, G. (2023, mars 31).** *Les différents types de spiruline.* <https://greeneden.fr/blog/les-types-de-spiruline>.
- **TechnAp. (2018).** *Historique de la découverte de la spiruline.* TechnAp-Spiruline. <https://www.technap-spiruline.fr/index.php/l-association/15-accueil/235-historique-de-la-decouverte-de-la-spiruline>.
- **Wikipédia. (2024, février 18).** *Cyanobacteriota.* Wikipédia. <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Cyanobacteriota&oldid=212572904>.

Annexes

Annexe01. Culture de la spiruline.

Annexe 02. Préparation des milieux.

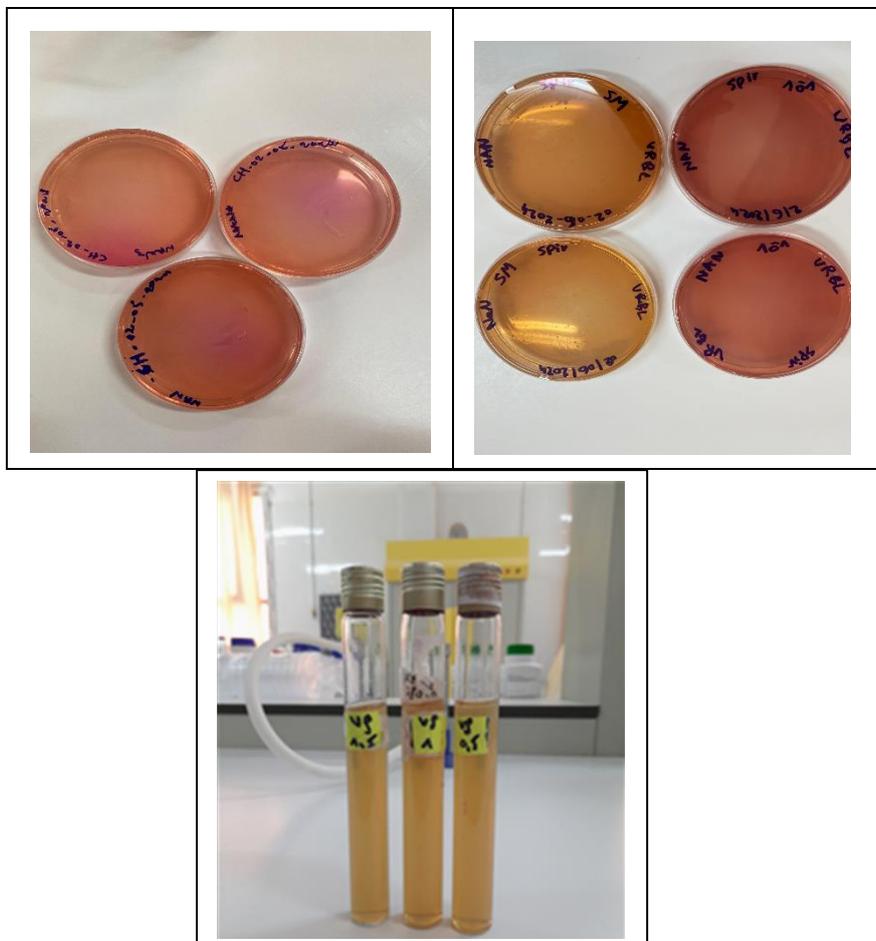
Les milieux	Préparation
	<p>Dissoudre 4.14 g dans 100 mL d'eau distillée puis autoclavage à 121°C 2 heures.</p>
	<p>Dissoudre 4.15 g dans 100 ml d'eau distillée Stériliser par autoclavage à 121°C pendant 2 heures.</p>
	<p>Dissoudre 1.1 g dans 100 ml d'eau distillée Stériliser par autoclavage à 121°C pendant 2 heures.</p>

Annexe 03 : Appareils utilisés



Balance mètre.	Agitateur.	pH mètre.
----------------	------------	-----------

Annexe 04 : résultats



Annexe 05. Récolte.



Résumé

Abstract:

Spirulina, scientifically known as *Arthrospira platensis*, is a filamentous cyanobacteria or green blue algae that reproduce easily in alkaline lakes. In our work we tried to grow spirulina in a different climate from the original climate and monitor the natural evolution over a week, taking into account the climatic factors and physical chemicals that affect its growth. From obtaining biomass worth 1.9 grams in a liter and a half. Finally, we conclude that spirulina has the ability to grow despite different climatic factors if it is provided with the appropriate agricultural medium.

Key words: Spirulina, culture, different climate, growth, biomass.

Résumé :

La spiruline, scientifiquement connue sous le nom d'*Arthrospira platensis*, est une cyanobactérie filamenteuse ou algue bleu vert qui se reproduit facilement dans les lacs alcalins. Dans notre travail nous avons essayé de cultiver la spiruline dans un climat différent du climat d'origine et de suivre l'évolution naturelle pendant une semaine, en tenant compte des facteurs climatiques et des produits chimiques physiques qui affectent sa croissance. Des tests pratiques ont prouvé la possibilité de le planter dans la qualité de l'eau utilisée (eau potable), à condition de prévoir un traitement aérobie et d'ajouter des éléments chimiques au milieu. Nous avons pu obtenir une biomasse de 1,9 grammes par litre et demi. Enfin, nous concluons que la spiruline a la capacité de pousser malgré différents facteurs climatiques si elle est fournie avec le milieu agricole approprié.

Mots clés : Spiruline, culture, climat différent, croissance, biomasse.

الملخص:

سبيرولينا، المعروفة علمياً باسم *Arthrospira platensis*، هي بكتيريا زرقاء خيطية أو طحالب خضراء زرقاء تتكاثر بسهولة في البحيرات القلوية. في عملنا حاولنا أن نزرع في المختبر السبيرولينا في مناخ مختلف عن المناخ الاصلي ومراقبة التطور الطبيعي على مدى أسبوع مع الاخذ بالاعتبار العوامل المناخية والكيمياويات الفيزيائية التي تؤثر على نموها. بعد الاختبارات العملية أثبتنا على إمكانية زرعها في نوعية المياه المستخدمة (مياه صالحة للشرب القرارة) بشرط توفير المعالجة الهوائية وإضافة العناصر الكيميائية للوسط حيث تمكنا من الحصول على كتلة حيوية بقيمة 1.9 غرام في لتر ونص. وفي الأخير نستنتج أن السبيرولينا لديها القدرة على النمو على الرغم من العوامل المناخية المختلفة إذا تم تزويدها بالوسط الزراعي المناسب.

الكلمات المفتاحية: سبيرولينا، زراعة، مناخ مختلف، نمو، الكتلة الحيوية.