REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DE MEDEA

FACULTE DES SCIENCES

Mémoire

Présenté pour obtenir le diplôme de **Master**

En Biologie

Spécialité : Microbiologie appliquée

Présenté par:

AMMAD DJAMILA

LARBI SELMA

Thème

OPTIMISATION DES CONDITIONS DE PRODUCTION DE BIOMASSE ALGUALE ARTHROSPIRA PLATENSIS

Soutenue publiquement le : 17/09/2020. Devant le jury composé de :

Examinateur 1 :	***KERDI Bilal***	**M.A.A**	**Université de Médéa**
Examinateur 2 :	***CHAMI Boazza***	**M.A.B**	**Université de Médéa**
Encadreur :	**AINASS Mahfoud**	**M.C.B**	**Université de Médéa**

Année universitaire : 2019/2020.



Remerciements

*Avant tout, nous remercions « **ALLAH***
le tout puissant de nous avoir accordé la
force, le courage et la patience pour
terminer ce projet de fin d'étude.
Nous remercions infiniment notre

*promoteur Monsieur M. **AINAS Mahfoud** pour ses*
conseils judicieux et sa bienveillance.
Qu'il soit assuré de notre profonde
gratitude pour nous avoir guidée et aidée
tout au long de la réalisation de ce
mémoire.
Nos remerciements vont également aux
*membres du jury : Mr **KERDI Bilal** Mr **CHAMI Boazza***
qu'ont accepté de juger notre
travail
Enfin nous voulons dire merci à tous les
enseignants du département de biologie
l'université de Yahia Fares.



Dédicaces

Je dédie ce mémoire

A mes chers parents mon père « Rabi Yarhmo » et surtout ma mère

Pour leur patience, leur amour , leur soutiens et leurs encouragements, je vous souhaite une longue vie avec la bonne santés , et que de bonheur .

A mes chers frères et sœurs : dawade ,Rachid ,

Fathia et Fatima Zahra qui m'ont encouragé durant mes études .

A mes chers enfants de la famille : Said, Abdo, Ishake, Sohaib, Imad, Saife, Malake, Amina, Nasma, Ritadje et Sondosse .

A ma chère binôme Selma

A tous mes amies et mes camarades en particulièrement Amina Talbi,

A tous ma famille.

Sans oublies tous les professeurs que ce soit du primaire, du moyen, du secondaire ou de enseignement supérieur.

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

A moi- même

DJAMILA

Je dédie ce modeste travail à …

À ma mère

Qui m'a donné la vie, le symbole, De Tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite.

Rien au monde ne pourrait compenser les efforts et les sacrifices que vous avez consenti pour mon bien être, et la poursuite de mes études dans de bonnes conditions.

À mon père

L'homme de ma vie, mon exemple éternel, qui a été mon ombre durant toutes les années des études, et qui a veillé tout au long de ma vie à m'encourager, à me donner l'aide et à me protéger. Aucune dédicace, ne saurait exprimer à sa juste valeur le profond amour que je vous porte. Que dieu vous garde, vous protège et vous procure la bonne santé.

A mes très cher frères RABEH.HAMZA et BILLEL

Mes très chères sœurs AMEL, SOUMIA, KHAOULA, MAYA et NADA

A tous les membres de ma famille, petits et grands veuillez trouver dans ce modeste travail l'expression de mon affection.

A mes très chères amies pour une sincérité si merveilleuses…jamais oubliables, en leurs souhaitons tous le succès…tout le bonheur.

En fin à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

LARBI Selma

Résumé :

Arthospira platensis est parmi les algues microscopiques qui vivent dans les lacs tropicaux salés. Il se caractérise par une couleur bleu –verdâtre, sa richesse en pigments végétaux et sels minéraux et sa grande capacité à réaliser la photosynthèse. il considérer comme complément nutritionnel important et efficace dans le groupe de régime. Et il a une grande importance dans la lutte contre des diverses maladies. La qualité et la quantité de biomasse produite est influencée par divers facteurs, la température, le pH et la composition du milieu en source de carbone, d'azote et en phosphate.

C'est dans ce contexte notre travail est dirigé pour vérifier les méthodes de production de *l'Arthrospira platensis* et de trouver les conditions optimales de croissance, tel que les facteurs physiologiques comme la température et le pH ainsi que la nature des sources de carbone, de l'azote et de phosphate. Les résultats révèlent des meilleures productions *Arthrospira platensis* dans les conditions suivantes, un pH de 9,5 et une température de 37°C. Pour la source de carbone, le glucose est le mieux adaptés pour la croissance de spiruline qui donne une production de biomasse plus optimale à 2.5g/L, la mélasse donne une productivité proche à celle de glucose avec un rendement optimal à une concentration inferieur de 0.75g/l. L'effet de la lumière montre que la production de la biomasse est proportionnelle avec intensité lumineuse, une forte intensité lumineuse conduit à une photolyse mais avec une forte agitation donne une croissance optimale.

Mots clés: *Arthrospira platensis* , Biomasse , pH, Température, Facteurs physico-chimiques,,

Milieu Zarrouk

Abstract:

Arthospira platensis is among the microscopic algae that live in tropical salt lakes. It is characterized by its blue-green color, its richness in plant pigments and mineral salts and its great capacity to carry out photosynthesis. Where Arthospira platensis is an important and effective dietary supplement….. It is considered an important and effective nutritional supplement in the diet group. And it has great importance in the fight against various diseases. The quality and quantity of biomass produced is influenced by various factors, temperature, pH and the composition of the medium as a source of carbon, nitrogen and phosphate.

In this context that our work is directed to verify the production methods of Arthospira platensis ….. It is in this context that our work is directed to verify the production methods of *Arthrospira platensis* and to find the optimal conditions for growth, such as physiological factors like temperature and pH as well as the nature of the carbon sources, nitrogen and phosphate. Where the results showed that the best production of *Arthrospira platensis* is under the following conditions : a pH of 9.5 and a temperature of 37°C . For the carbon source, glucose is the best suited for the growth of spirulina which gives a more optimal biomass production at 2.5g/L, molasses gives a productivity close to that of glucose with an optimal yield at a lower concentration 0.75g/L. The effect of light shows that biomass production is proportional with light intensity, high light intensity leads to photolysis but with strong agitation gives optimal growth.

Key words: Arthrospira platensis , Biomass , pH, Temperature, Physico-chemical. factors,,

Middle Zarrouk

الملخص:

أرثروسبيرا بلاتونسيس هي من بين الطحالب المجهرية التي تعيش في بحيرات الملح الاستوائية. وتتميز بلونها الأزرق المخضر وثرائها في الأصباغ النباتية والأملاح المعدنية وقدرتها الكبيرة على إجراء التمثيل الضوئي. حيث تعتبر مكملا غذائيا مهما وفعالا في مجموعة النظام الغذائي. ولها أهمية كبيرة في مكافحة الأمراض المختلفة.حيث تتأثر جودة وكمية الكتلة الحيوية المنتجة بعوامل مختلفة : درجة الحرارة، درجة الحموضة، ومحتوى الوسط من مصدر الكربون والنيتروجين والفوسفات.

في هذا السياق ، يتم توجيه عملنا للتحقق من طرق إنتاج أرثروسبيرا بلاتونسيس وإيجاد الظروف المثلى للنمو ، مثل العوامل الفيزيولوجية مثل درجة الحرارة ودرجة الحموضة وكذلك طبيعة مصادر الكربون ، النيتروجين والفوسفات. تظهر النتائج إنتاجية أفضل لأرثروسبيرا بلاتونسيس فـي ظل الظروف التالية : درجة حموضة 9.5 ؛ ودرجة حرارة 37 درجة مئوية. بالنسبة لمصدر الكربون فإن الجلوكوز هو الأنسب لنمو السبيرولينا الذي يعطي إنتاجًا أمثل للكتلة الحيوية عند 2.5 غ / لتر ، كما يعطي دبس السكر إنتاجية قريبة من إنتاجية الجلوكوز مع عائد مثالي بتركيز أقل من 0.75 غ / لتر. يظهر تأثير الضوء أن إنتاج الكتلة الحيوية يتناسب مع شدة الضوء ، وتؤدي شدة الضوء العالية إلى التحلل الضوئي ولكن مع التحريض القوي يعطي النمو الأمثل.

الكلمات المفتاحية :

ارثروسبيرا بلاتونسيس ، الكتلة الحيوية ، درجة الحموضة ، درجة الحرارة ، العوامل الفيزيائية ؛ وسط زروق

Liste des abréviations

ADP : adénosine di-phosphate

ATP : adénosine triphosphate

PRB : photobioréacteur

PSI : photosystèmes I

PSII : photosystèmes II

DO : densité optique

PAR: rayonnement photosynthétiquement actif

Chl : chlorophylle

OMS : l'Organisation mondiale de la Santé

FAO : Food and Agriculture Organisation

Umax : taux de croissance

X : la concentration en biomasse

Ps : poids sec

R : rendement

IBC : concentration initiale de biomasse

Nomenclature

CaCl2 : chlorure de calcium

Co (NO3)2, (6 H2O): nitrate de cobalt

CuSO4, (5 H2O):sulfate de cuivre

DMSO :Diméthylsulfoxyde

EDTA : acide éthylène diamino-tétra-acétique

FeSO4, (7H2O): sulfate ferreux monohydrate

H3BO3: acide borique

H2S : sulfure d'hydrogène

K2Cr2 (SO4)4, (24H2O): chromium potassium sulfate

K2HPO4 : phosphate d'hydrogène de potassium

K2SO4:sulfate de potassium

MgSO4, (7H2O) : Heptahyrate de sulfate

MnCl2, (4H2O) : chlorure de magnésium

MOO3 : trioxyde de molybdène

Na2WO4, (2H2O) : tungstate de sodium

NaCl : chlorure de sodium

NADPH : Nicotinamide adénosine diphosphate

NADPH;H+ : Nicotinamide Adénine Di nucléotide Phosphate

NADP+ : nicotinamide-adénine dinucléotide phosphate

RuBP :ribulose biphosphate

RuBisCO : ribulose bisphosphate carboxylase-oxygénase

PGA : phosphoglycerate

C3P : triose phosphate

Na2CO3 : carbonate de sodium

NaHCO3 : bicarbonate de sodium

NaNO3 : nitrate de potassium

NH4VO3: vanadate d'ammonium

NiSO4, (7H2O): sulfate de nickel

Ti2(SO4)3:sulfate de thallium

ZnSO4, (7H2O): sulfate de zinc

Liste de figures

Figure1 : spiruline observées au microscope…….. Page 3

Figure 2 :carte des principaux lieux de spiruline dans le monde……... Page 6

Figure 3 : morphologies typiques de spiruline (Jarisoa., 2005)…… Page 7

Figure 4 : cycle biologiques de la spiruline selon (Balloni et al.1980 in charpy,2008)…… page 11

Figure 5 : Représentation schématique des thylacoïdes chez les cyanobacterie….. page 13

Figure 6: Schéma du transport cyclique des électrons. P680 : photosystème II, PQ :plastoquinone, PC : plastocyanine, Cyt b6_f : cytochrome b6_f , PS700 : photosystème I…… Page 15

Figure 7 : le cycle de calvin……. page 17

Figure 8 : compositions chimiques de la spiruline…… Page 18

Figure 9 : Filtration et Egouttage de la spiruline à travers une toile…… page 24

Figure 10 : séchage et conditionnement de la spiruline…… page 25

Figure 11: déférentes étapes de production artisanale de la spiruline…….. Page 26

Figure 12 : exemple de bassin ouvert de culture de spiruline…… Page 29

Figure 13: des bassins améliorés à Hawaï……. Page 30

Figure 14: photobioréacteur plat…… Page 32

Figure 15 : photobioréacteur de type colonne…… Page 33

Figure 16: photobioréacteur tubulaire…… Page 34

Figure 17:prototype Bloom commercialisé par la société Alg &You……... Page 35

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : position taxonomique de l'espese Arthrospira platensis…….page 8

Tableau 2 : Valeurs moyennes des toxiques minéraux de la spiruline……..page 36

Tableau 3 : Composition chimique d'un milieu minérale proposé par Jourdan ……..page 40

Tableau 04: composition chimique de milieu Zarrouk .....…….page 40

Tableau 05 : composition chimique de solution d'oligoélémentA5 ……..…page 41

Tableau 06 : composition chimique de solution d'oligoélément B6……page41

Tableau 07 : Effect of different light intensity on biomass production of Spirulina platensis**……..**page60

Sommaire

Introduction Générale ……page 1

SYNTHESE BIBILIOGRAPHIQUE

Chapitre I : Généralité sur la spiruline Arthrospira platensis

I .1. Spiruline (Arthrospira platensis)……. Page 3

I.1.1.Définition…….. Page 3
I.1.2.Historique……. Page 4
I.1.3.Distribution géographique dans le monde……... Page 5
I.1.4. Morphologie et les caractères généraux……..... Page 6
I.1.5. Taxonomie d'Arthrospira platensis……. Page 9
I.1.6. Cycle de vie de spiruline……. Page10
I.1.7. La photosynthèse …… Page11
I.1.7.1 .Les réactions claires……. Page14
I.1.7.2. Le cycle de Calvin …… Page16
I.1.8. Les Compositions chimique de la spiruline……. Page17
I.1.8.1. Les protéines…… Page18
I.1.8.2. Les lipides……... Page18
I.1.8.3. les glucides…… Page19
I.1.8.4.acide nucléique ……. Page19
I.1.8.5.les vitamines ……. Page19
I.1.8.6.minéraux et oligo-éléments…… Page20
I.1.8.7 pigments …… Page20
I.2. Les applications de la spiruline ……. Page21
I.2.1.En alimentation humain …….. Page21
I.2.2.En alimentation animal …….. Page21
I.2.3.En cosmétique……. Page22
I.2.4.En thérapeutique ……. Page22

Chapitre II : Production de la spiruline

II.1.Production de spiruline …….. Page23

II.1.1.production artisanale …….. Page23

II.1.1.1. la méthode de production artisanale……... Page23
II.1.2.Production semi- industrielle et industrielle ……... Page26

II.2.Système de production……...…… Page27
II.2.1. Les systèmes Batch et Continue…….. Page27
II.2.2. Bassin ouvert de culture…….. Page29

II.2.3. Photobioréacteur …… Page30

II.2.3.1.Qu'est-ce qu'un photobioréacteur ? ……. Page30

II.2.3.2. les formes géométriques …….. Page31

II.3. Culture individuelle de la spiruline…….. Page34
II.4. Risques de toxicité liée à la production…… Page35
II.4.1. Contamination par des métaux lourds ou éléments traces métalliques……. Page36

II.4.2. Contamination par des cyanobactéries et leurs toxines ……... Page37

II.4.3. Contamination par des bactéries pathogènes……. Page37

Chapitre III : croissance de la spiruline

III. LES CONDITION PHYSO-CHIMIQUE DE CROISSANCE …… Page39

III.1. Les compositions du milieu…… Page39

III.2. Les besoins élémentaires de croissance…….. Page42

III.2.1.Eau …….. Page42

III.2.2.Alcalinité et salinité ……. Page42

III.3. les besoins nutritionnelles…… Page42

III.3.1.la source d'azote …… Page43
III.3.2. la source de carbone …… Page43

III.3.3.la source minérale …… Page43

III.4.Paramètres physiologiques…….. Page44

III.4.1.Température du milieu…… Page44

III.4.2.pH du milieu……. Page44

III.4.3. agitation de milieu de culture …….. Page45

III.5. cinétique et mesure de croissance ……... Page47

III.5.1. Détermination de concentration de biomasse …….. Page47

III.5.1.1.Méthode de Disque de Secchi…….. Page47

III.5.1.2. Méthode de Densité optique…….. Page48

III.5.1.2.1.la méthode de poids sec…… Page48
III.6. Les paramètres cinétiques de croissance…….. Page49
III.6.1.Umax et Temps de croissance……. Page49
III.6.2. calcule de rendement……..... Page50

Chapitre VI : les facteurs du milieu et de croissance de spiruline

VI. les facteurs du milieu et de croissance de spiruline ……..Page52

VI.1.Effetde l'azote……. Page52
VI.2. Effet de carbone ……..... Page53
VI.2.1.Fixation de CO2……. Page53
VI.2.2.l'effet de source Carbonique organique sur la croissance de spiruline ……. Page54
VI.3. Effet de phosphate …… Page55
VI.4.l'effet l'azote et la photosynthèse …… Page57
VI.5. Effet de la lumière ……..... Page58

Conclusion …….. page63

Reference bibliographique

Annexe

Introduction

Introduction

Le groupe des cyanobactéries sont parmi les plus anciens êtres vivants apparus sur terre et leur présence remonte au précambrien, il y a presque 3,5 milliard d'années. D'après Decho et sescollaborateurs (2005) ces organismes seraient à l'origine de la vie sur terre.et de l'apparition de l'atmosphère oxygénée, Parmi elles existent le genre Spirulina ou Arthrospira.

La spiruline, Arthrospira platensis, est une cyanobactérie filamenteuse, photosynthétique. De couleur bleu –verdâtre, qui se développe naturellement dans les zones fortement ensoleillé, dans les eaux alcalines de certains lacs en zones tropicales et subtropicales **(FOX., 1999).**

La Spiruline Consommée depuis des siècles par certains peuples primitifs d'Afrique et d'Amérique, et connue par les scientifiques depuis plusieurs décennies pour sa richesse nutritionnelle, très riche en protéines, en vitamines, en minéraux, la chlorophylle et des phycobiliproteines. et en diverses substances d'intérêt. Il est bien établi que les variations de conditions de culture provoquent facilement de forts changements dans la composition biochimique des spirulines. **(Sguera,S ,2008)**

La spiruline a attiré l'attention des chercheurs depuis de nombreuses années, leur potentiel bénéfique a été expérimentalement trouvé in vitro et in vivo pour traiter certaines pathologies et dans la prévention de l'hypercholestérolémie, certaines maladies inflammatoires, les allergies, le cancer, la toxicité induite par le médicament, les infections virales, les maladies cardiovasculaires et le diabète …etc **(KHAN et al., 2005 ; KULSHRESHTHA et al., 2008 ; KARKOS et al., 2008).**

La qualité de biomasse de spiruline produite est très influencée par les conditions du milieu tel que la composition de milieu de culture qui doit répondre au besoin nutritionnel de la spiruline , la nature de source d'azote, source de carbone et les sels minéraux, **(Fox R-D , 1999**) leurs concentration dans le milieu de culture qui doit apportés pour maintenir une composition de biomasse qui répond au normes. **(Fox R-D , 1999**), . **(Vonshak. A Vigad, 2002)**

Les rendements des cultures et le taux de croissance sont gouvernés par les conditions externes de culture comme la température ambiante et l'intensité lumineuse émise qui doivent être dans la gamme optimale. **(Vonshak. A Vigad, 2002)**

Lor ce que ces conditions sont décale des points optimale, les effets néfaste s'exerce sur la culture, dans le quel on obtient des faibles croissances et des rendements négligeable.
Dans ce cas, on cherche à répondre aux questions posées :
-quelle sont les concentrations du substrat et les intensités de lumière d'éclairage de PBR qui permettent d'avoir une meilleure production de biomasse alguale .
-quel seront les conditions physiologiques et physicochimiques du milieu permettant d'améliorer la croissance de spiruline et d'optimiser la production de biomasse.
Notre étude sera répartie en quatre parties :
Dans la première partie, nous présenterons la spiruline de manière générale en évoquant son histoire, ses caractéristiques, et sa composition et ses applications.

Dans la deuxième partie, nous évoquerons sa production et plus particulièrement celle d'une ferme de production normande et son risque de toxicité lié à la production.

Dans le troisième chapitre présent les conditions physico-chimique de croissance, et les paramètres de cinétiques de croissance.

Le quatrième chapitre est le dernier chapitre présent les conditions optimale de croissance de spiruline.

Synthèse bibliographique

I .1. Spiruline (Arthrospira platensis)

I.1.1.Définition

La spiruline ou Arthrospira platensis est une algue bleu microscopique qui Pousse naturellement dans certain lacs chauds et alcalin, se développe dans la Régions tropicale et subtropicale.

Elle est considéré comme une micro- algue planctonique et comme une Bactérie appartenant aux cyanobactéries filamenteux spirale, c'est un Microorganisme unicellulaire photo-autotrophe, capable utiliser l'énergie lumineuse pour la photosynthèse **(cruchot, 2008),** se caractériser par la couleur Bleu vert qui se lié à sa teneur en pigment bleu (phycocyanine) et vert (chlorophylle) , riche en protéine .Elle est pourvue de vésicule gonflée de gaz, qui lui permettent de flotter à la surface de l'eau **(Doumenge et al, 1993).**

La spiruline est un moyen efficace pour produire des composés de grande valeur économique et scientifique **(Jeon et al, 2005 in Castro et al, 2014).**

Elle est utilisée comme nourriture et complément alimentaire pour l'homme et les animaux**(GershwinetBelay,2007)**.

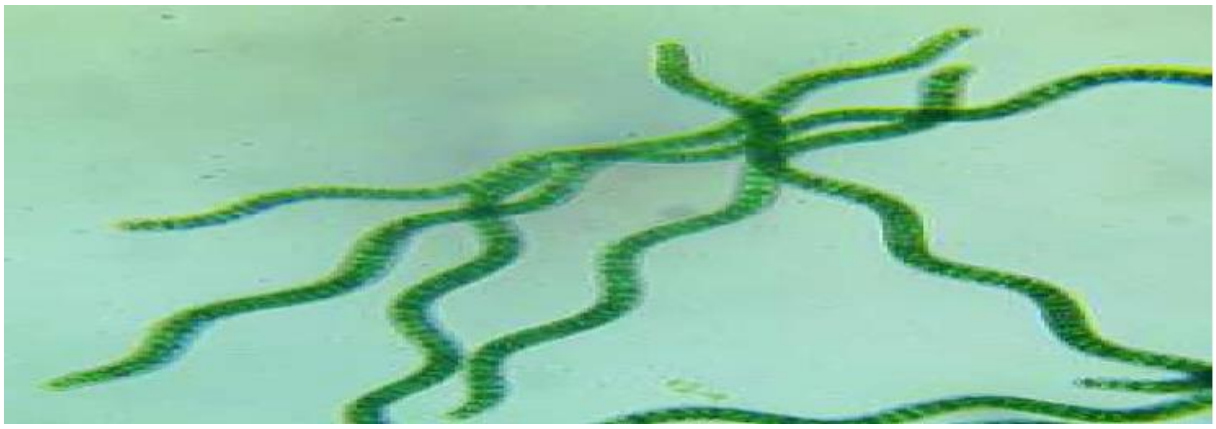


Figure1 : spiruline observées au microscope : Spiruline platensis **(Niangoran ., 2017)**

I.1.2.Historique

La spiruline est un élément très ancien qui admit par la communauté Scientifique que l'apparition des cyanobactéries date de 3.5 milliard d'années constituant ainsi des plus anciennes forme de vie sur terre.

En 1492, au Mexique *Christophe Colomb* découverte que la spiruline est constituant principale dans la nourriture des Aztèque au Mexique sous le nom de Tecuitlat et se trouve dans grand lac texcoco. Elle est considérée la première fois comme une algue bleue (cyanophycées) par *Wittrock et_Nordstedt* en 1844 sous le nom de Spirulina jenneri platensis

Nordsted**. (Doumenge F. ,1993)**En 1852, que sera publié le premier rapport taxonomique, rédiger par *Stizenberger* qui lui donne le nom d'Arthrospira en raison de sa forme en hélice et de sa structure multicellulaire.

La spiruline découverte au Tchad en 1940 par le botaniste français du nom *Dangeard*. Les Kanem bous, tribu du Tchad consomment encore de jours sous le nom de Dihé. En France le botaniste *Dangeard* fais une présentation à la société Linnéenne de Bordeaux en 1940 en mentionnant pour la première fois l'utilisation de la Spiruline en alimentation humaine**. (Paniagua-Michel *et al* ., 1993).**Redécouverte vers 1950 par la communauté scientifique, l'analyse de ses constituants révéla une valeur nutritionnelle exceptionnelle de par sa richesse Inégalée en protéines, lipides insaturés, vitamines antioxydants et minéraux essentiels.

Ce n'est que dans le milieu des années 1965-1967 que la spiruline commença à La spiruline découverte au Tchad en 1940 par le botaniste français du nom *Dangeard*. Les Kanem bous, tribu du Tchad consomment encore de jours sous le nom de Dihé. En France le botaniste *Dangeard* fais une présentation à la société Linnéenne de Bordeaux en 1940 en mentionnant pour la première fois l'utilisation de laSpiruline en alimentation humaine**. (Paniagua-Michel *et al* ., 1993).**Redécouverte vers 1950 par la communauté scientifique, l'analyse de ses constituants révéla une valeur nutritionnelle exceptionnelle de par sa richesse

La spiruline découverte au **Tchad** en 1940 par le botaniste français du nom *Dangeard*. Les Kanem bous, tribu du Tchad consomment encore de jours sous le nom

de Dihé. En France le botaniste *Dangeard* fais une présentation à la société Linnéenne de Bordeaux en 1940 en mentionnant pour la première fois l'utilisation de la Spiruline en alimentation humaine**. (Paniagua-Michel *et al* ., 1993).**Redécouverte vers 1950 par la communauté scientifique, l'analyse de ses constituants révéla une valeur nutritionnelle exceptionnelle de par sa richesse, se faire connaitre grâce à un botaniste Belge, Jean Léonard qui lui aussi découvrit les fameuses galettes bleues-vertes de spiruline sur les marchés tchadiens.

Depuis les années 1980, la spiruline a fait l'objet de plusieurs dizaines d'études scientifiques par des chercheurs du monde entier, et nous sommes encore loin de connaitre tous les effets bénéfiques d'une consommation quotidienne de spiruline. **(C. Girardin-Andréani ., 2005)**

I.1.3.Distribution géographique dans le monde

La spiruline est une cyanobactérie faisant parties des plus anciennes formes de vie terrestres. Consommée depuis des siècles par certains peuples primitifs d'Afrique et d'Amérique. Elle est présente dans différent pays de monde. La spiruline ou l'Arthrospira platensis se développe naturellement dans des eaux chaudes, les lacs alcalins, contenant du carbonate de sodium (Na2CO3), ou du bicarbonate de sodium (NaHCO3), et riches en nutriments azotés et phosphate. Plus communément, elle observe dans les eaux saumâtres, ainsi que dans les lacs Salins de régions tropicales et semi-tropicales. Son caractère thermophile et ses besoins importants en lumière limitent son aire de réparation à une bande intertropicale située environ entre 35° de latitude Nord et 35° de latitude Sud. Elle est existée à l'état naturel à la fois dans les lacs alcalins en Afrique (Tchad, Ethiopie, Tunisie, Algérie, soudan, Madagascar), en Amérique latine (Mexique, Pérou), en Asie du sud (Inde, Sri Lanka, Thaïlande), en

Europe(France).



Figure2 Carte des principaux lieux de spiruline dans le monde **(Lahoucine H A. ,2019)**

I.1.4. Morphologie et les caractères généraux

I.1. 4.1. Morphologies

La spiruline a une longueur moyenne de 250um, quand elle possède de 7 spires. Elle composé des filaments ou trichome simple pluricellulaire, hélicoïdale, mobiles (de 10à 12 Um de diamètre) non ramifiés enroulés en spirale, généralement en 6 à7 spires **(Tabuttin et al. 2002).** Leurs parois sont gram négatif **(Battulo et al. 2005).**

La spiruline est constituée des cellules transparentes empilées bout à bout formant ainsi un filament ou trichome. Plusieurs des facteurs environnementaux tels que la température auraient cependant une influence sur l'orientation de l'hélice**,** Cette morphologie typique lui permet de se déplacer dans l'eau en adoptant le mouvement d'une vis **(BENSEHAILA., 2016)**

On distique plusieurs forme morphologique de la spiruline : la forme spiralée, la forme ondulée et la forme droite.

- les "spiralées", désigne les souches dont les filaments ont la forme d'une queue de cochon, telle la "Lonar" (variété présente en Inde),

- les "ondulées" désigne les souches dont les filaments sont en spirale étirée, telle la "Paracas" (variété présente au Pérou),

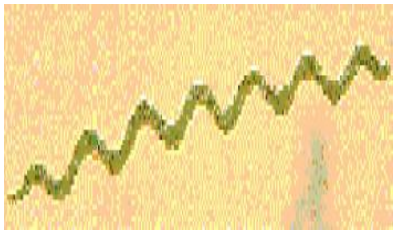
- les "droites" désigne les souches dont les filaments sont tellement étirés qu'ils donnent l'impression d'être presque rectilignes telle la variété M2 **(Jarisoia, 2005).**



Forme spiralée (type Toliara)



Forme spiralée (type Lonar)



Forme ondulée (type Paracas)



Forme droite (type « M2 »)

Figure3 : morphologie typique de spiruline **(Jarisoa.,2005)**

I.1.4.2. Paramètres de croissance

La spiruline est une espèce photoautotrophe aérobie .Elle se développe dans les conditions de croissances suivante : l'eau, les éléments nutritifs (principalement azote, phosphore, le potassium et le carbone(CO_2)), la température, le pH et la lumière.

Le milieu de culture le plus importante pour la croissance et la production de spiruline c'est le milieu Zarrouk. La croissance de Arthrospira platensis lié avec l'activité photosynthétique et La qualité et la quantité de la lumière. La spiruline est utilisée la lumière pour la photosynthèse qui constituaient la clé de sa croissance .

La photosynthèse est divisée en deux phases : une série de réaction dites « Lumineuses » et une série de réaction dites « obscures »

Les réactions lumineuses : nécessitent la présence de la lumière et s'effectuent dans les membranes thylakoidiennes .Les réactions obscures ont lieu dans le stroma (matrice) du thylakoïde qui ne nécessitent pas de lumière **(Cruchot., 2008)**

I.1.4.3. Déplacement

La plupart des cyanobactéries sont capables de se déplacer, soit à l'aide de vésicules gazeuses (dans les liquides verticalement) soit dans le cas des cyanobactéries filamenteuses, par glissement (jusqu'à 25 microns par seconde) grâce à des microfibres **(Falquet, 1996).**La spiruline est capable utilisée deux types de déplacement : la flottabilité et la motilité par glissement

I.1.4.3.1.la motilité

La spiruline constitué des filaments (trichome) motile, ce déplacements 'effectue par des mouvements en vrilles à plus de 5 u par seconde. **(Fox., 1990) .**Le microscope électronique montre clairement et comprendre la motilité des filaments. Cette technique met en évidence l'existence des fimbrias de 2 à 10nm de diamètre et 1 à2 µm de longueur .Le mouvement ondulatoire de ces fimbrias peuvent propulser le filament en avant .Si ces fimbrias, au lieu de s'aplatir, étaient positionnées plus ou moins à angle droit par rapport à l'axe long du filament, elle voir le filament .Et en reversant la direction de ce petite mouvement circulaire, faire avancer le filament dans la direction opposée. **(Fox . ,1999)**

I.1.4.3.2. La flottabilité

La spiruline peut donc évoluer dans l'eau. Spécialement intéressantes sont la vésicule de gaz dégonflables qui, peuvent faire montrer les filaments dans la colonne d'eau pour atteindre la lumière pour la photosynthèse. Ces vésicule environ 70nm de long et 10nm de diamètre, prendre la forme de type creux cylindriques comportant des capuchons conique à chaque extrémité. Elles se trouvent habituellement près de la paroi terminale des cellules en groupe empilés avec ordre de juste quelques-unes à une centaine ou plus. Elles apparaissent au microscope optique comme des taches brillantes. Elle se forme les vésicules de gaz lorsque la lumière du soleil apparait :

tels des ballons dirigeables, elle permettent au filament de spiruline de remonter en surface pour recevoir la lumière et ainsi commencer la photosynthèse **(Fox,1999)** .La photosynthèse augmente la pression interne et cela dégonfle les vésicules de gaz , envoyant des filaments d'algue au fond(quand la lumière du jour s'éteint ou avant).La limitation en CO2 augmente la flottabilité ,la production d'hydrates de carbone diminue la flottabilité.

I.1.5. Taxonomie d'Arthrospira platensis

La spiruline est une cyanobactérie (anciennement désignée par le terme « algue bleue » puis cyanophycée). Appartient au monde végétal de par sa chlorophylle, et au monde animal de par ses cellules procaryotes apparentée à celles des bactéries (**Doumenge et al ,1993*)*** apparue sur la terre il y a environ trois milliards et demi d'années.

Le mot « SPIRILINA » est le nom commerciale anglophone du genre Arthrospira, a ne pas confondre avec le genre spirulina non comestible, par exemple : *Spirulina major,Spirulina subtilissima, Spirulina princeps* **(Fox, 1999)**

Les deux espèces les mieux connues sont Arthrospira platensis, originaire d'Afrique et *Arthrospira maxima* originaire d'Amérique centrale, des analyses moléculaires peuvent présenter un outil important contribuant à l'identification des espèces d'Arthrospira en raison de l'insuffisance de l'approche morphologique qui existe entre les deux. **(Sili et al 2012)**

Tableau 1 : Position taxonomique de l'espèce Arthrospira platensis **(Fox, 1999)**

Règne	Monera ou bactérie
Sous –règne	Procaryota
Phylum ou division	Cyanophyta ou cyanobacteria
Classe	Cyanophyceae
Ordre	Oscillatoriales

Famille	Oscillatoriaceae
Genre	Arthrospira
Espèce	Arthrospira platensis

I.1.6. Cycle de vie de spiruline

La spiruline se présente sous forme de filaments constitués de cellules juxtaposées, sa reproduction est asexuée et se reproduit très rapidement, La vitesse de croissance dépend de plusieurs facteurs dont le pH. Elle est maximum à pH inférieur à 10,(**Jourdan , 2018**) le déplacement à une manière d'une vis s'enfonçant dans des bois**(Reviers , 2003)**.

Le filament de spiruline à maturité forme de cellules spéciales appelées nécridies, Elles se différencient des autres cellules par leur aspect biconcave et sont assimilées à des disques de séparation. A partir de ces derniers, le trichome De la spiruline forme des hormogonies par la fragmentation. Les Hormogonies vont croître en longueur par division binaire (chacune des cellules va donner deux cellules par scissiparité) et prennent la forme typique hélicoïdale (**Balloni *et al.* 1980 in Charpy, 2008) (figure 4).**

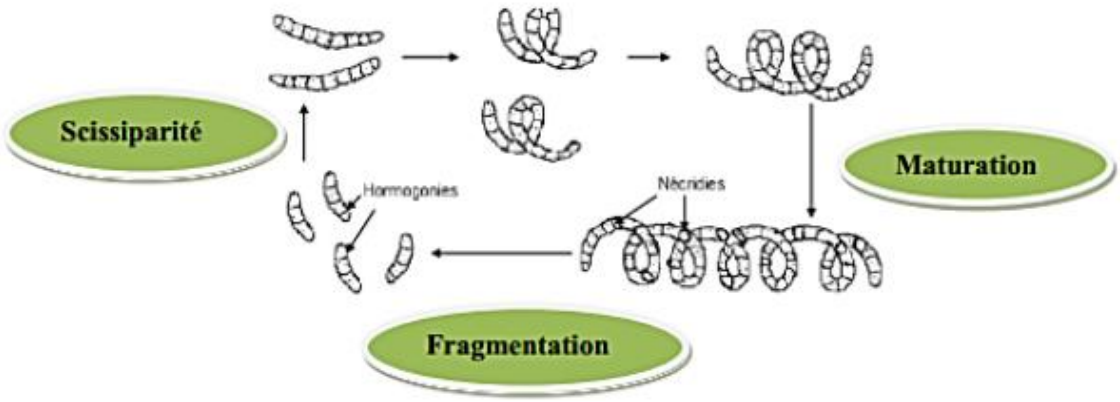


Figure 4 : cycle biologique de la spiruline selon (Balloni et al. 1980 in Charpy ,2008)

I.1.7. La photosynthèse

La lumière est un facteur important dans la croissance des micro-algues, elle nécessaire pour la photosynthèse. une limitation ou un excès de lumière peut donc avoir des conséquences sur le métabolisme des cellules et de leur croissance, donc la qualité et la quantité de lumière influencent la croissance et la physiologie de la spiruline.(**Niangoran,2017)**

La photosynthèse est un processus bioénergétique utilisé par les plantes terrestres ainsi que les microorganismes photosynthétiques (notamment les algues). Elle se compose d'une série de réaction complexes d'oxydoréduction durent laquelle l'énergie lumineuse, est captée par les pigments sous forme d'énergie électromagnétique,, principalement les chlorophylles vertes et aussi par les caroténoïdes oranges, chez les algues bleues, la phycoérythrine et la phycocyanine bleue. les pigments agissent comme des antennes recevant l'énergie des photons et la transmettent à des centres de réaction spécifique.

Ce processus permet la conversion de l'énergie lumineuse (photons) en énergie chimique (ATP et NADPH) utilisée par les cellules pour synthétiser du carbone organique et la libération d'une molécule d'oxygène, à partir de gaz carbonique (CO_2) , et l'eau (H_2O) **, (ARTU 2016)**

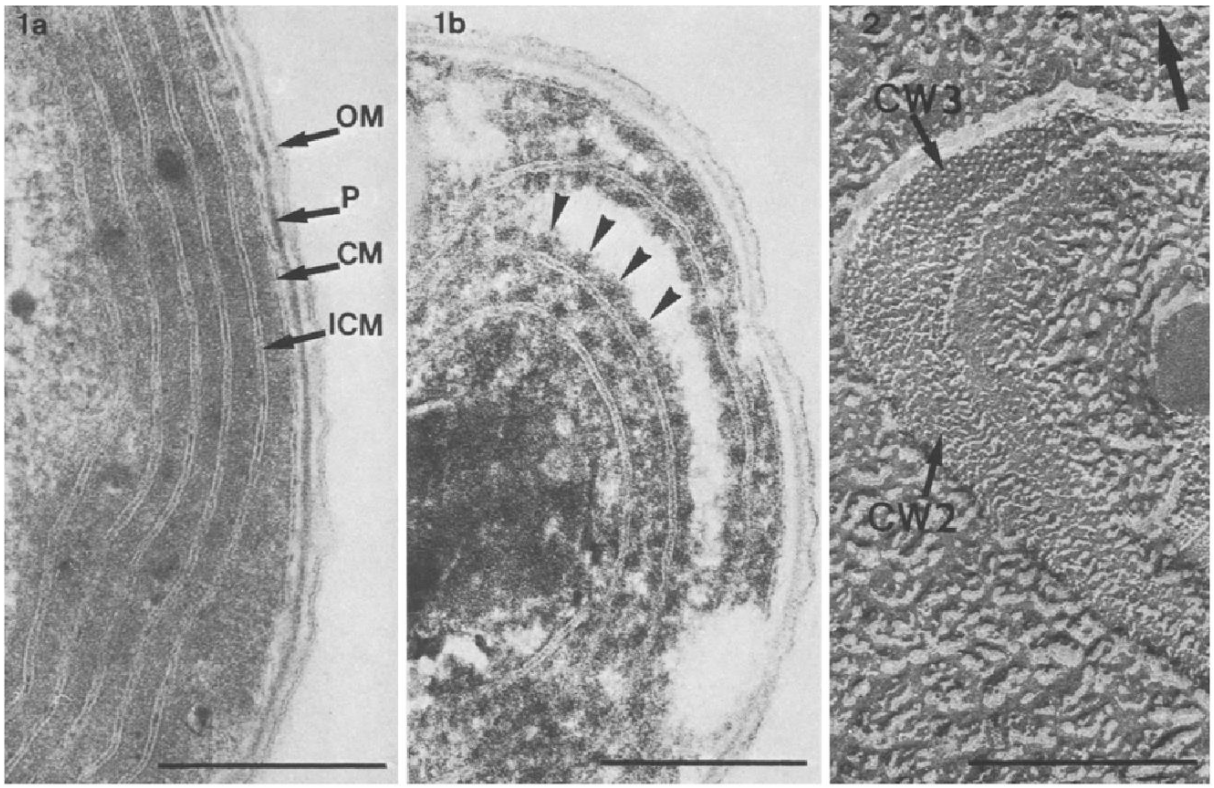
La photosynthèse est décrite usuellement par l'équation simplifiée suivante :

$$Co_2 + H_2O + \text{Énergie lumineuse} \longrightarrow [CH_2O] + O_2$$

Cette équation a des apparences de simplicité mais présente un processus fort complexe. des nombreuses actions physiques et chimiques ce déroule lors la photosynthèse, compliquées et interdépendantes (stockage d'énergie, transport d'électron, action enzymatique …) par la succession de deux types de réactions : les réactions claires (phase lumineuse) et les réactions sombres (ou biochimique), Ces deux types de réactions ont été mises en évidence par Emerson et Arnold en 1932 **(Reece 2011)** à partir d'une suspension de Chlorelle.

Le processus de photosynthèse a lieu au sein des thylakoïdes. Les thylakoïdes possède une structure stratifie une dans l'autres ressemble au poupe russe. Une

enveloppe entourant un fluide dense appelé le stroma. Dans le stroma se trouvent des thylakoïdes empilés en grana où siège la photosynthèse.. **(Reece 2011**). C'est dans l'espace thylakoïde que l'ensemble des réactions liées à la photosynthèse a lieu.



exhibiting the cell wall and the intracytoplasmic membrane system OM (outer membrane.); P(phycobilisomes); CM (cytoplasmic membrane) ;ICM (intracytoplasmic membrane).

Figure 5 : Représentation schématique des thylacoïdes chez les cyanobacterie (**Jochen R. Golecki., 2004)**

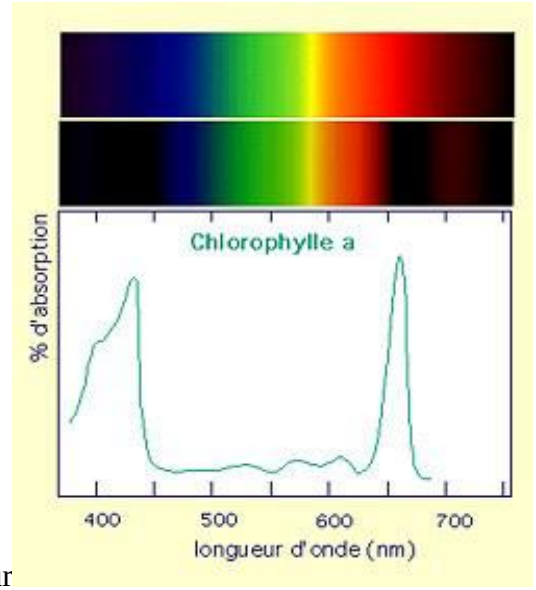
Les pigments des antennes absorbent le rayonnement photosynthétiquement actif (PAR pour Photosynthetically Active Radiations usuellement compris entre 400 et 700 nm) Cette région spectrale correspond plus ou moins à la place de lumière visible à l'œil humain,Les photons aux longueurs d'onde plus courtes ont tendance à être si énergiques qu'ils peuvent endommager les cellules et les tissus, Les photons à plus grande longueur d'onde ne transportent pas assez d'énergie pour permettre la photosynthèse.donc ne réémettent pas l'énergie ni ne la transmettent directement aux réactions primaires de la photochimie. . A la place, cette énergie est transférée à des chlorophylles spécialisées appelées P700 et P680 situées respectivement dans les

centres réactionnels de photosystèmes I et II, et qui comme leur nom l'indiquent, fonctionnent à des niveaux énergétiques correspondant respectivement à 700 et 680 nm. **(ARTU 2016)**

I.1.7.1 .Les réactions claires

Se déroule au niveau des thylakoïdes et nécessite la présence de la lumière

L'énergie des photons lumineux est captée selon leur longueur d'onde par les antennes du photosystème et est transmise jusqu'aux molécules de chlorophylle (Chl) ; celles-ci vont perdre un électron et passer dans un état oxydé. Les pigments absorbent certaines longueurs d'onde : la chlorophylle absorbe la lumière rouge et la bleue mais pas la verte, qui lui donne sa couleur



Les électrons arrachés parcourent toute une chaîne de transporteurs (séries de réactions d'oxydo-réduction) jusqu'à un accepteur primaire, qui les transmet à une chaine de transporteurs d'électrons, dirigeant ces électrons vers le PSI.(**FOX 1999)**

Le centre réactionnel devant récupérer les électrons perdus, celui-ci va donc, par l'intermédiaire d'une enzyme, scinder une molécule d'eau, libérant alors deux électrons, captés par le centre réactionnel, ainsi que de l'oxygène et des protons.

Le photosystème II, absorbe 2 photons, perd 2 électrons qu'il donne à son accepteur primaire d'électrons, qui les cède à son tour à une chaîne de transport. Qui donne les électrons au centre réactionnel du photosystème I **(ARTU 2016)**

Le photosystème I, lui aussi, perdu 2 électrons, Celui-ci les cède à une seconde chaîne de transport, Le dernier transporteur d'électrons de cette seconde chaine de transport est une enzyme nommée NADP-réductase. Cette enzyme va transférer les électrons au NADP+ contenu dans le stroma, qui en acceptant ces deux électrons, va se lier à l'hydrogène pour former du NADPH, H+.**(ARTU 2016)**

Lors du passage des électrons, il y aura aussi passage d'ions H+ du stroma vers l'espace intrathylakoïdien, Ces ions diffuseront vers le stroma, ceci ne peut se faire que par l'ATP-synthase (la membrane du thylakoïde étant imperméable aux protons). Une molécule d'ATP est alors synthétisée grâce au flux de protons généré en assemblant une molécule d'ADP et un phosphate inorganique.

Les molécules d'ATP et de NADPH, H+ serviront au final au cycle de Calvin (réactions sombres). (**ARTU 2016)**

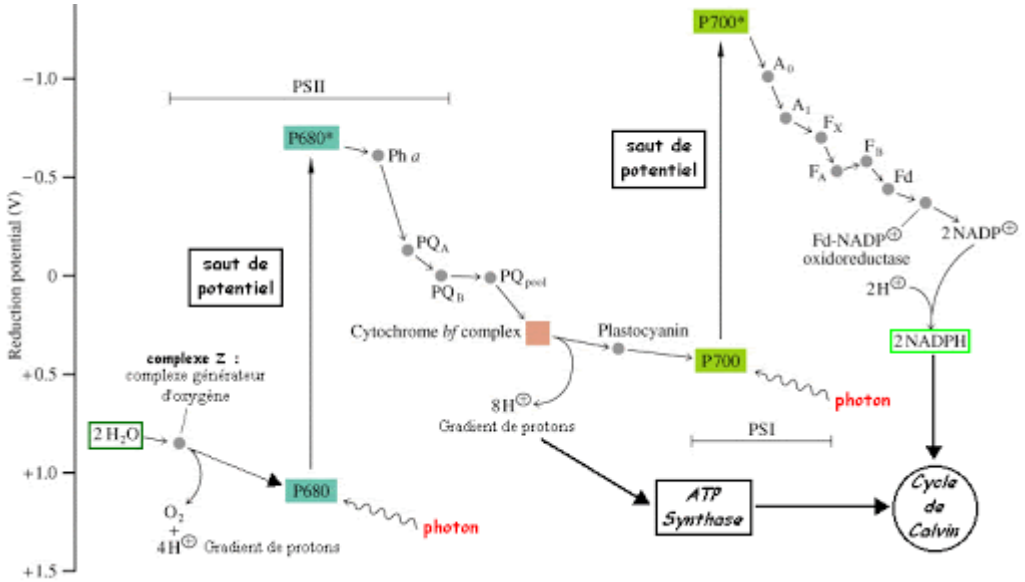


Figure 6: Schéma du transport cyclique des électrons. P680 : photosystème II, PQ :plastoquinone, PC : plastocyanine, Cyt b6_f : cytochrome b6_f , PS700 : photosystèmeI,**Fd:ferrédoxine**https://www.google.com/url?sa=i&url=http%3A%2F%2Fbiochimej.univangers.fr%2FPage2%2FCOURS%2FZsuite%2F2Photosynthese%2F6SchemaZ%2F1SchemaZ.htm&psig=AOvVaw2oXH2gW95j22FYnoE7qYb&ust=1595788039966000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjhxqFwoTCIi9svKD6eoCFQAAAAAdAAAAABAx>

I.1.7.2. Le cycle de Calvin

Nommées réactions sombres, elle se déroule dans le stroma, c'est l'ensemble des réactions liées à la fixation du carbone, **(Farineau et morot-gaudry,2018)** Elle ne nécessite pas la présence directe de lumière mais elle est couplée à la phase photochimique par utilisation de leur énergie stockée sous forme d'ATP et NADPH,H+,

La première étape est la phase de fixation de carbone, permettre la synthèse de 2 3-phosphoglycerate (3PGA) à partir de CO2 et de ribulose-1,5-biphosphate (RuBP), réaction déclenchée par une enzyme, la RuBisCO.

La seconde phase est appelée phase de réduction, Chaque molécule de phosphoglycérate reçoit un groupement phosphate supplémentaire pris à l'ATP, le NADPH,H+lui cède ses électrons et ses protons et réduit la molécule de 1,3-biphosphoglycerate . Cette réaction d'oxydo-réduction permet la formation du triose phosphate (C3P).

La troisième phase du cycle est la régénération du RuBP ,la molécule de G3P est un sucre à trois carbones. Pour douze moles de G3P synthétisées, seulement deux sont transportées vers la voie métabolique des sucres, le reste étant dirigé pour régénérer le ribulose 1-5 biphosphate de départ.

Cette dernière phase permet de boucler le cycle de Calvin en synthétisant des molécules de RuBP à partir de G3P sous l'action d'ATP afin de régénérer le premier accepteur de CO2.

La fixation du CO2 ne nécessite pas directement de lumière pour avoir lieu, c'est pourquoi elle est aussi appelé réaction sombre. Cependant de par sa dépendance énergétique aux produits de la photosynthèse, elle reste intimement liée à celle-ci.

L'ombrage est nécessaire quand la température de la culture est très basse, inférieure de 10 C° avec une forte intensité lumineuse pour éviter la destruction de la Spiruline par la photolyse, ainsi une culture sous ombrage est plus facile à récolter et la qualité de la Spiruline est améliorée **(Jordan, 1999).**

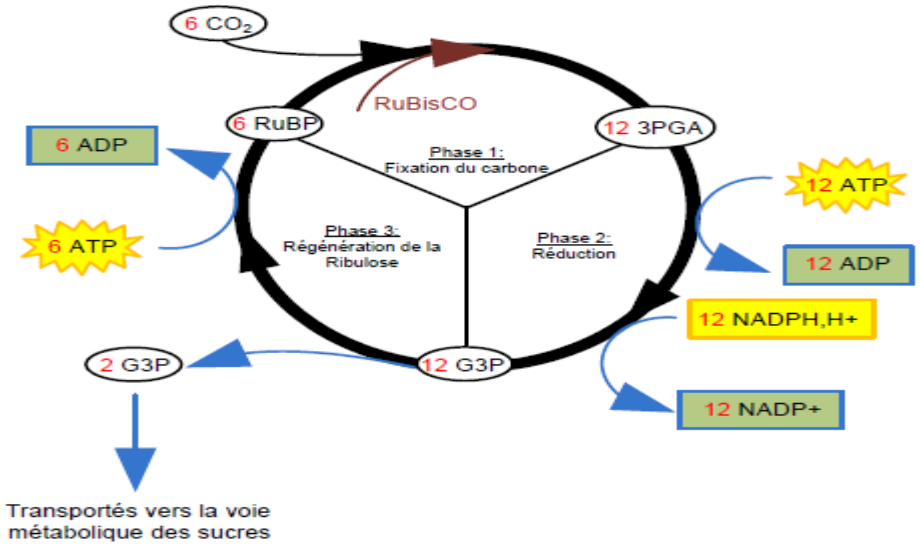


Figure 7 : schéma representant le cycle de calvin **(ARTU 2016)**

I.1.8. Les Compositions chimique de la spiruline

La teneur en éléments nutritifs dépend de la localisation et de l'environnement dans lequel l'algue se développe ***(khan et al ,2005).***

La spiruline, arbore une teneur record en protéines de 70%. qui sont à une grande qualité nutritionnelle **(floc'h et leclerc ,2010)** , ainsi que sa composition idéale en vitamines , lipides , minéraux , et oligo-éléments font d'elle un complément alimentaire intéressant dans le cadre d'une alimentation déficitaire ou déséquilibrée **(cruchot, 2008), La figure 5** présente la composition biochimique de la spiruline en pourcentage dans 100gramme de poids sec .

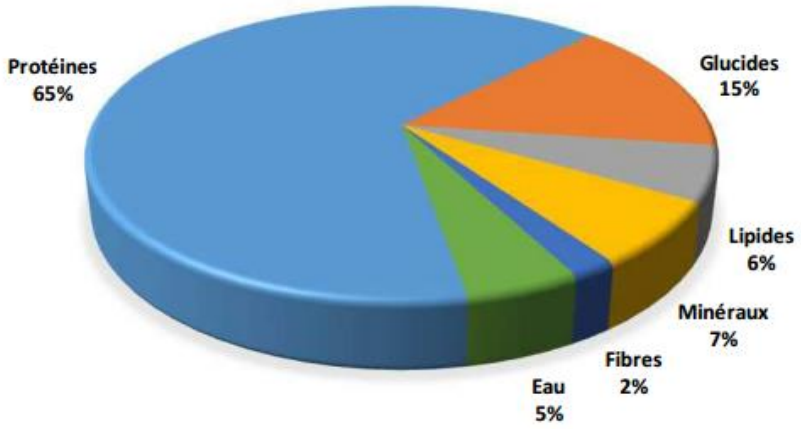


Figure8 .composition chimique de la spiruline **(lecointre,2017)**

I.1.8.1. Les protéines

D'un point de vue qualitatif , Les protéines de la spiruline sont complètes , car tous les acides aminés essentiels y figurent , ils représentent 47% du poids total des protéines (**Falquet et Hurni , 2006) ,** ces acides aminés étant incapable de les synthétiser par notre organisme ,plusieurs études ont montré que la spiruline contient des acides aminés essentiels dans les proportions recommandées par la FAO (Food and Agriculture Organisat**io**n ou Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture) .

Avec une teneur en protéines comprise entre 50 et 70 % de son poids sec, la spiruline est quantitativement plus riche que la plupart des aliments. Elle possède des niveaux protéiques similaires à ceux de la viande et du soja **(Martínez-Galero *et al*., 2016; Lupatini *et al.*, 2017).**

I.1.8.2. Les lipides

la teneur totaux des lipides est comprise entre 5 à 10 % du poids sec de la spiruline**(Gutierrez –salmeàn et *al* .,2015)** cette fraction lipidique se caractérise par un bon équilibre acides gras satures sur acides gras polyinsaturés . On retrouve 83% de fraction saponifiable et 17% de fraction insaponifiable dans les lipides **(Charpy et *al*. 2008).**

Les lipides présentent un rôle énergétique et structural contribuant au maintien de l'architecture cellulaire, aussi la présence d'acide gras insaturé essentiel dans la spiruline est très important, ils diminuent l'agglomération des plaquettes sanguines et inhibent l'hypertension causée par le sel **(Horrobin D F. 1990)**

I.1.8.3. les glucides

Premières sources énergétiques de l'organisme, ils exercent une fonction dans la constitution des tissus fondamentaux de l'organisme et indispensable au fonctionnement du cerveau et des muscles.

Ils Représentent 15 à 25% du poids sec de la spiruline. **(Falquet & Hurni, 2006).** Les glucosamines et l'acide muramique associes à des peptides, constituent la paroi cellulaire des spirulines, cette paroi s'apparente à celles des bactéries gram négatif .bien que non digestible, ces parois sont fragiles et rendent le contenu cellulaire très accessible aux enzymes des digestions. (**Ahounou 2018)**

Les sucres simple comme le glucose , le fructose , et le saccharose , ainsi que les polyols comme le glycérol , le mannitol et le sorbitol , ne sont présents qu'en très faible quantités, les glucides assimilables sont des polymères : rhamnosannes et des glucosannes amines respectivement environ 2 % et 10% . On note aussi la présence de glycogène 0.5%. **(Ciferri, 1983; Flaquet, 2006) . Quillet M., 1975)**

I.1.8.4.acide nucléique

Le taux d'acides nucléiques est compris entre 4à6% dans la matière sèche **(Gutiérrez-Salmeán *et al.* 2015)** cette faible fraction exclut tout risque de production de l'acide urique qui peut s'accumuler dans le sang après la dégradation biochimique des bases puriques, et qui est l'origine de certaines pathologies (calculs rénaux, crise de goutte …). **(charpy et al,2008** ;**Ahounou 2018)**

I.1.8.5.les vitamines

Les vitamines sont essentielles à l'organisme, elles interviennent dans de nombreuses fonctions biologique, incapable de les fabriquer par le corps humain. (**Ahounou 2018)**

De toutes les vitamines, la vitamine B12 est la plus grande et la plus complexe, Le fait que la spiruline ait une teneur exceptionnellement élevée en vitamine B12 comme le font les autres algues marines est d'une grande importance car cette vitamine est généralement contenue uniquement dans les aliments d'origine animale. Ainsi, cette algue pourrait être considérée comme une bonne source pour les végétaliens, car ils ne consomment aucun aliment d'origine animale. **(Gutiérrez-Salmeán *et al.* 2015)**

I.1.8.6.minéraux et oligo-éléments

La spiruline est naturellement riche en certain minéraux essentiels particulièrement importants lors de la malnutrition, les plus importants sont le fer , le zinc, le magnésium , le calcium , le phosphore et le potassium sa compositions en minéraux est varié suivant le milieu de culture , **(Johnson et shubert ,1986)**

I.1.8.7 pigments

La spiruline est riche en pigments responsables de sa couleur. Les principaux pigments sont la phycocyanine , la chlorophylle et le caroténoïde , ces pigments sont actives par la lumière et présentent un intérêt dans l'industrie alimentaire et pharmaceutique.

a. la phycocyanine

est un pigment protéiques, representent30% du poids sec de l'algue, seul colorant bleu alimentaire naturel, ce pigment absorbe et capture les photons puis transforme cette énergie lumineuse en énergie électrobiochimique **(Fox , 1999)**

La phycocyanine attribuée de nombreuses activités biologique, antioxydant, anti-inflammatoire, anti-tumorale (**Vololonavalona et *al*, 2008)**

b. la chlorophylle

La chlorophylle est la photos-pigment majeur impliqué dans les systèmes PSI et PSII, absorbant les photons et permettant la transmission de l'énergie d'excitation à la réaction de photosynthèse (**Bhaya et al. 2000).** La teneur en chlorophylle dans la biomasse algale est calculée à partir de l'absorbance à 665 nm **(lamela et al.2000).** Le taux de chlorophylle contenu dans la spiruline est de 1%. Le rapport

phycobiliprotéines/chlorophylle varie de 2,5 à 4,5 en fonction de la salinité du milieu et des conditions de culture **(Leema et al. 2010).**

c. Les caroténoïdes

Sont des pigments liposoluble absorbent l'énergie de la lumière dans le domaine de longueurs d'onde allant de 300à500nm **(Jeffrey et *al*. 1997)**

Elles servent des pigments accessoires récoltant des photons et les transférant à la chlorophylle en cas de basse intensité lumineuse **(young –In park 2012)** et jouent un rôle de protection pour la chlorophylle en période de forte illumination.

I.2. Les applications de la spiruline

De par sa composition, Arthrospira nous offre plusieurs propriétés bénéfiques, la spiruline est intéressante pour l'alimentation animale et humaine et aussi en domaine thérapeutique et de nombreuses filières d'applications représentées comme suite :

I.2.1.En alimentation humain

La spiruline est consommée comme complément alimentaire dans les pays développés et depuis peu dans quelques régions d'Afrique, leur qualité nutritionnelles est rendent très intéressante dans la lutte contre la malnutrition et aussi utilisé dans les préparations alimentaire des enfants **(charpy et *al* ,2008)**

la spiruline est vendue pour une alimentation équilibrée par ses apports en micronutriments, et aussi pour l'amélioration des capacités sportives par ses teneur en fer, en vitamine B12 et en ß-carotène, et activité antioxydant et antitumorale liée à la phycocyanine , activité antivirale, et pour renforcer le système immunitaire grâce au polysaccharide(**Belay et *al* 1993),** plusieurs études sont faites sur les rats ou sur des humains montrent des résultats bénéfiques de l'effets de la spiruline sur l'hyperlipidémie , la propagation des tumeurs, la radioprotection, la flore intestinale , le diabète, l'obésité , l'hypertension . **(Belay et *al* 1993).**

I.2.2.En alimentation animal

La spiruline est considérer comme un second choix peut se valoriser dans l'alimentation des animaux (poulet, vaches, chevaux de course, poissons, etc.) elle améliorer leur apparence, leur qualité ou leur performances, et leur santé et renforcer les défenses immunitaires par ajouter la spiruline aux granulés dans la nourriture des poissons d'élevage en aquaculture, plus souvent soumis à des infections virale et /ou bactérienne que les poissons sauvages. Ces résultats suggèrent que la spiruline alimentaire a des effets immunostimulateurs sur le système immunitaire inné de la carpe**. (Watanuki *et al*. (2006)** , elle favorise la croissance et la fertilité **(James et *al.* 2006)** et aussi augmenter et améliorer la pigmentation des crevettes et des poissons par utiliser la spiruline en aquaculture **(Regunathan & Wesley 2006).**

I.2.3.En cosmétique

de nombreux produits à base de spiruline apparaissent sur le marché, mis en contact avec les parties superficielles du corps humains (épiderme ,ongles , lèvres), tels que les crèmes anti-âge et les masques cryogéniques par son action sur la renouvellement cellulaire contribue au maintien de la tonicité et engendre souplesse et élasticité de la peau , **(charpy et *al*,2008)** ,aussi utiliser comme des crèmes cicatrisantes et antiseptiques.

I.2.4.En thérapeutique

La spiruline à un effet contre les allergies, la lutte contre l'ostéoporose. Elle est utilisée dans le traitement des carences nutritionnelles (malnutrition proteino-energitique, anémie et hypovitaminose **(Trabelsi L.2009).**

Elle renforcement des défenses immunitaires, en empêchant la réplication de certain virus par quelque constituants comme le calcium spirulan, La spiruline et en particulier le calcium spirulan agirait de deux façons, d'une part en empêchant les virus d'entrer dans les cellules et donc de se répliquer et d'autre part en stimulant les défenses immunitaires afin qu'elles les éliminent. **(Evoli conseil, 2014).**

Elle est bien connue par son effet bénéfique dans la diminution de l'artériosclérose chez les patients diabétiques grâce à la bêtacarotène et la vitamine E et

-utilisé en imagerie médicales comme traceur fluorescent (**Boudoure, 2008)**

II.1Production de spiruline

La production de la spiruline peut se faire à diverses échelles : artisanale, semi-industrielle et industrielle. Ces modes et ces moyens de production variaient d'un mode à l'autre selon les paramètres suivante : la surface totale des bassins de culture et leur surfaces initiales, les moyens et matériaux utilisés. Les degrés de technologie, les objectifs. Le processus de fabrication de la spiruline passe cependant par les mêmes étapes obligatoires. **(Charpy *et al.*, 2008).**

II.1.1.production artisanale

L'exploitation artisanale est un mode de culture a été initié par Ripley FOX dans les années quarante pour lutter contre la malnutrition dans les pays en voie de développement.

Les fermes artisanales de spiruline sont des systèmes d'exploitation nécessitant un faible apport en énergie. La surface des bassins est très variable, n'excédant pas la centaine de m² pour une surface totale inférieure à 3000 m². Les moyens mis en œuvre peuvent être rustiques, faisant appel au bon sens et à l'ingénierie. Elles peuvent présenter des caractéristiques de ferme semi-industrielle. La qualité de la production est contrôlée tout au long des étapes de production. Elles sont destinées à l'humanitaire ou en partie à la commercialisation **(Charpy *et al* ., 2008).**

II.1.1.1. la méthode de production artisanale

La production artisanale de spiruline se passe par plusieurs étapes :

a. Mise en route d'une culture

Pour lancer une production artisanale de spiruline il faut de l'eau contenant des nutriments du soleil et une température entre 25et 40C° .Pour assurer cette production, il faut avoir fait les bon choix du site et des matériaux de construction, disposes de quelque instrument de laboratoire (balance, loupe ou microscope).De quelque outils simple à réaliser, d'intrants (engrais) et d'une souche de Spiruline robuste.

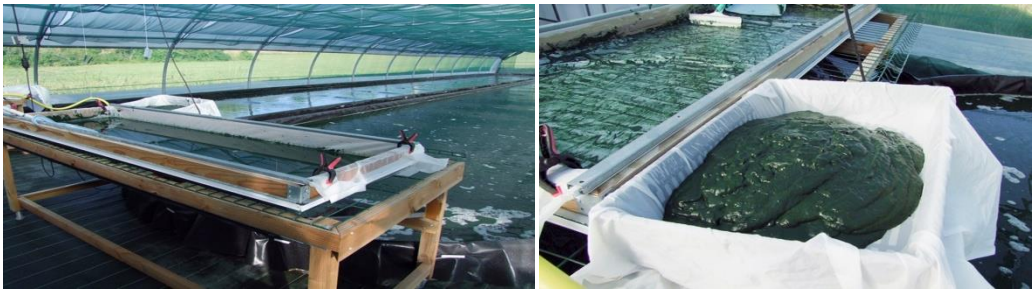
Les choix du site doit tenir compte : (le climat, l'accès à l'eau, la possibilité d'acheter les intrants) .La taille minimum recommandés pour un bassin est de 60m² .Les bassins sont remplis d'eau à un niveau atteignant 15 à20 cm.

Le milieu de culture est basé sur celui de Zarrouk (1966), modifié la plupart du temps en fonction des disponibilités des intrants.

L'agitation des bassins se fait de plus en plus avec une roue à aube ou une pompe. **(Charpy et *al*,. 2008).**

b. récolte et extrusion (filtration de la spiruline)

La récolte de la spiruline s'effectue en pompant l'eau des bassins et en la faisant passer à travers une toile très fine (30 microns).cette toile va retenir la plupart des filaments spirulines alors que l'eau va retourner au bassin .La spiruline est ramassée et misse en égouttage .quand la quantité récoltée est suffisante, il forme un paquet entouré de toile pour préparer l'étape suivantes. **(charpy et *al* ,. 2008). (figure a ,b).**



-a- **-b-**

Figure 1 : a; b Filtration et Egouttage de la spiruline à travers une toile

La biomasse humide est pressée. La spiruline fraiche ainsi obtenue peut être consommée directement, ou séchée pour conservation. **(Charpy et *al.*, 2008).**

c. -séchage et conditionnement

Pour que le séchage soit plus rapide, la pâte de spiruline est misse en forme en longs filaments disposés sur des clayettes. Cette opération est réalisée avec un poussoir, type de poussoir à saucisse auquel a été ajouté un tube percé en inox, fait sur mesure. **(figure c,d)**





-c - **-d-**

Spiruline pressées, à cette étape elle a la Consistances d'une « pâte à modeler

-la spiruline est misse en forme en filament pour faciliter le séchage

Figure 2 : c ; d séchage et conditionnement de la spiruline

La biomasse est extrudée en spaghettis afin de pouvoir la sécher plus facilement. Elle est mise à sécher dans des séchoirs solaires, à gaz ou Electriques. La norme de la teneur en eau de spiruline sèche est inférieure à 10°/°. Le séchage dans un four jusqu'à 60°.

La spiruline Sèche est alors broyée sous forme de poudre ou sous forme des paillettes et conservée dans un récipient étanche à l'abri de l'humidité et de la lumière .La spiruline peut être conditionnée dans des sachets, boites ou flacons sous formes de brindilles, de poudre, de gélules et de comprimés **(Charpy et *al*., 2008) .**



Séchage à basse température de la spiruline dans un déshydrateur.

Figure 3 : déférentes étapes de production artisanal de la spiruline

II.1.2.Production semi- industrielle et industrielle

Les systèmes de production semi- industrielle et industrielle se différencient par l'ordre de grandeur de l'investissement, la surface des bassins de culture, le tonnage de production, et la sophistication des techniques de production.

II.1.2.1. La production semi-industrielle de spiruline

Les fermes semi-industrielle sont des systèmes de production qui peuvent être modulaires et démarrer à partir de petite exploitation de type artisanal et utilisent les mêmes technologies .ces fermes sont constituées de bassins de 200 à 1000 m2avec une surface totale exploitée entre 3000 m2 et 1 hectare .Leur capacité de production annuelle est de 10 à50 tonnes (**Aurélie 2014)**

Elles sont destinées à l'humanitaire et à la commercialisation. Leur objectif est d'être pérenne et autonome grâce à la vente de leur produit **(Charpy et *al* ., 2008)**.

II.1.2.2. la production industrielle de spiruline

Ce système de production représentée depuis plus de 20 ans par de grosses compagnies telles que Earthrise ou Cyanotech .cette production se distinguent des précédentes par l'importance des moyens mis en œuvre , leur capacité de production et leur objectif clairement commercial .ces fermes sont constituées des bassins de 1000 à 5000 m2 de surface ,et leur production entre 50 et 500 tonnes de spiruline sèche par an .

La qualité est contrôlée de manière automatique par des systèmes informatisés **(charpy et *al*, .2008)**

II.2.Système de production

II.2.1. Les systèmes Batch et Continue

Système Batch

Est le système le plus simple à mettre en place, Les cellules sont inoculées dans un bioréacteur de façon stérile, Par la suite, aucun ajout n'est réalisé tout au long de la culture,, en dehors de ceux nécessaires aux régulations des paramètres physico-chimiques (par exemple ajout de base pour la régulation du pH).et contrôlé la température, Cependant l'accumulation de déchets toxiques (comme le lactate ou l'ammoniaque) et l'épuisement des nutriments du milieu de culture entrainent un ralentissement puis un arrêt de la croissance des cellules et enfin la mort cellulaire. Les cultures durent environ 5 à 7 jours pour les procédés les plus optimisés. (**Sophie 2017)**

Système continue

Le système continue caractériser par un apport permanent en milieu nutritif et une récolte de la biomasse simultanée permettant de maintenir le volume de culture constant, C'est ce système qui permet d'obtenir les productivités les plus importantes car l'atténuation lumineuse peut être maintenue à l'optimal lorsque l'apport de lumière est constant.il existe deux modes de culture en continu : le mode chemostat et le mode turbidostat

le mode chemostat

Se caractérise par un débit d'alimentation en milieu nutritif constant et un débit de récolte égal au débit d'alimentation, le plus souvent réalisé par débordement (ou surverse) du photobioréacteur

Une fois l'équilibre de la culture atteint, la concentration cellulaire devient une constante. En fixant les autres paramètres expérimentaux (température de 30 °C, pH de milieu 9 et irradiance de 260 ± 10 µmol.m-2.s-1), il est alors possible d'avoir accès à la biomasse produite dans ces conditions définies. **(Erell OLIVO ,2007)**

le mode turbidostat

L'équilibre de la culture est ici contrôlé par la turbidité, le débit d'alimentation est ajusté en fonction de la concentration dans le PBR. Une sonde de turbidité (photodiode) transmet le signal de concentration à la pompe d'alimentation qui régule son débit pour maintenir cette dernière constante. La variation de la concentration est donc nulle en fonction du temps lorsque l'équilibre est atteint. (**ARTU 2016)**

Dans les deux modes, une fois la culture à l'équilibre (régime permanent), le taux de croissance spécifique de la microalgue est égal au taux de renouvellement. Donc, en connaissant le volume du photobioréacteur, le volume et le temps de récolte (surverse), un calcul simple donne le taux de croissance spécifique moyen :

$<\mu> = V_{surverse} / \Delta T_{surverse} / V_{Photobioréacteur}$

Système semi continu

En culture Fed-batch ou semi continu, le milieu de culture est ajouté, le système est régime stationnaire. Le volume dans la cuve augmente alors au cours du temps. Le débit est réglé de façon à ce que la concentration en substrat soit constante dans la cuve et que l'effet de dilution n'inhibe pas la production de biomasse. La culture croît jusqu'à atteindre à nouveau la phase stationnaire. Il est alors possible d'en prélever encore une certaine quantité. Le Fed-batch permet en pratique un gain de temps, une augmentation de productivité et une possibilité de modification du milieu en cours de culture. **(N'Goran Urbain2017)**

II.2.2. Bassin ouvert de culture

Les bassins ouverts de culture sont les systèmes d'exploitation qui ont été majoritairement utilisés pour la culture industrielle et artisanale des microalgues (la spiruline).ces systèmes sont plus faciles et moins chère à construire et à exploiter que les réacteurs fermés. Ils sont les moins énergivores et ont une maintenance et un nettoyage facile **(Brennan et Owende, 2010).**

Les systèmes ouvert utilisent généralement que la lumière naturelle, il n'y a donc pas de cout associé à l'apport de lumière pour ces systèmes de culture. Dans ces systèmes de production se trouvent des problèmes de contamination par d'autre organismes (des bactéries , champignons ,protozoaire ,…) et de grosse pertes d'eau par évaporation **(Chisti,2007),** absence de contrôle des conditions de culture (lumière ,température ,…). (**Sheehan *et al*.,1998)**

Actuellement, les systèmes ouverts sont les plus répandus. Certains présenté également des améliorations (automatisation, contrôle des nutriments, régulation des conditions de culture …)



Figure 4 : exemple de bassin ouvert de culture de spiruline**.** FondateurUA http://urbanalgae.fr/2016/12/production-microalgues/

Les cultures à ciel ouvert utilisent en générale des bassins en forme d'hippodrome qui favorisent une bonne réparation des micros algues (la spiruline) dans le milieu de culture et un bon accès à la lumière.

Les bassins ouverts de culture sont traditionnellement situés soit dans des zones à fort ensoleillement jouissant d'un climat tropical ou soit sous des systèmes de serres qui permettent de recréer ce climat. La taille des bassins varie entre 1000 et 5000 m2, ils contiennent également des nutriments nécessaires au bon développement de ces organismes.



Figure 5 : des bassins améliorés à Hawaï **(Giuliana Becerra-Celis)**

II.2.3. Photobioréacteur

II.2.3.1.Qu'est-cequ'un photobioréacteur ?

Les photobioréacteurs sont des réacteurs fabriqués à partir de matériaux transparents et sont constitués des tubes en plastique transparent posé sur plan incliné, long d'une dizaine de mètres et haut de 2m. La conception des photobioréacteurs est basée sur la surface éclairée, l'efficacité du mélange et le contrôle des paramètres de culture (température, teneur en dioxyde de carbone et en oxygène, pH).

Pour atteindre une productivité maximale .Les photo bioréacteur se sont des système fermés utilisée pour assurant la production de microorganismes photosynthétiques en

suspension dans l'eau tels que la spiruline .ces systèmes fermés ont été conçus pour pallier les problèmes des bassins **(Brennan et Owende,2010)**. Ils offrent un environnement de culture clos, ils protègent la culture des contamination directes, permettent un meilleur contrôle des conditions de culture : la température est contrôlée efficacement, l'accès à la lumière est augmenté par rapport au bassin, l'évaporation du milieu de culture est minimisé, l'approvisionnement en CO2 est facilité et ses pertes sont limités **(Contreras et *al*., 1998)**. Le photobioréacteur permet la disposition efficace de la lumière mais aussi l'enlèvement de l'oxygène produit par la photosynthèse **(Babcock et *al* ., 2002)**. Les tubes, les bioréacteurs et les micros fermes sont employés dans les pays tempérés ou froids, où cette Cyanobactérie ne peut pas croître naturellement.

II.2.3.2. les formes géométriques

Les photobioréacteurs existent sous nombreuses formes mais déférent en plusieurs catégories : les photobioréacteurs plats, les photobioréacteurs cylindriques et les photobioréacteurs tubulaires.

II.2.3.2.1.Les photobioréacteurs plats

Les photobioréacteurs plats ont été introduits par Milner en 1953**(Takache, H 2010).** Ce sont des réacteurs de faibles épaisseurs, généralement inferieur à 10cm **,**se composent de deux panneaux parallèle transparents pour laisser passer la lumière , de surfaces variables et entre lesquels réside une mince couche de culture d' épaisseur de quelques centimètres . Ils sont disposés verticalement ou horizontalement avec une centaine inclinaison pour maximiser l'intensité lumineuse incidente **(Chisti, 2007).** Ce système utilise pour assurent la pénétration de la lumière et la production importante de biomasse et fort rendement de photosynthétique **(Milner H.W 1953).**

Le problème principale de ce type de photobioréacteur est que le CO2 est très mal absorbé .Ces systèmes peuvent aussi accumuler une forte concertation en oxygène dissous **(Tredici ,2004),** ce qui inhibe la photosynthèse, et le contrôle de température est difficile (**Brennan et Owende ,2010).**



Figure 6 : photobioréacteur plat **(N'Goran Urbain 2017)**

II.2.3.2.2. Les photobioréacteurs cylindriques

Un photobioréacteur cylindrique est un système fermé importante et plus courante dans la production de biomasse de micro algue (la spiruline) , se compose d'un ou plusieurs tubestransparents, de diamètres et longueur variables, de configurations diverses et au sein des quels circule de culture.

Le photobioréacteur cylindrique est largement répandu car leur conception est simple et faciles à redimensionner vers des volumes importants de plusieurs centaines de litres **(Tsygankov 2001)**.

Plusieurs des types de photo bioréacteur cylindrique existent, les photobioréacteurs de type colonne et les photobioréacteurs de type annulaire.

b-1 le photobioréacteur de type colonne

Les photobioréacteur en colonne sont le plus employées pour les petites productions de microalgue comme pour les écloseries.

Ce photobioréacteur se compose d'une colonne verticale en matériau transparent, de diamètre variable, mais assez faible pour laisser passer la lumière jusqu' au centre de culture. Le système est éclairé par des tubes fluorescents situés sur les côtés.

b-2 le photobioréacteur de type annulaire

Les photobioréacteurs annulaire sont des photobioréacteurs cylindrique composés de deux tubes de diamètres différentes emboités l'un dans l'autre pour constituer ainsi un espace annulaire dans lequel circule la culture.

La variante annulaire est intéressante du point de vue de la distribution de la lumière artificielle que l'on peut situer au centre du système de tubes. Cependant, ce type de géométrie est plutôt complexe et difficile à extrapoler car elle occupe une surface importante au sol pour un volume de culture restreint.(**Habchi et Belhadj 2013)**



Figure 7 : photobioréacteur de type Colonne (**FAO, 1996)**

a- photobioréacteur tubulaire

les photo bioréacteur sont des tubes de faibles diamètres entre 2 et 6 cm **(Miron et *al* ., 1999)** pour permettre la disponibilité de la lumière au centre de la culture .Ils peuvent atteindre des longueurs très importantes (jusqu'à 500 km) , ils sont agencés de manière variables (verticalement ou horizontalement) sous forme de serpentins , parallèles , enroulés hélicoïdalement. Ce système peuvent être éclairé par des lompes de types fluorescente ou simplement exposée à la lumière du soleil. L'apport de nutriment, en

CO2 et en milieu est généralement effectué par une cuve annexe aux tubes. **(Miron et *al* ., 1999)**

Les photobioréacteurs tubulaire sont les seuls systèmes fermés à être utilise à grande échelle **(Christenson et Sims,2011)** .ils assurent la bonne production de biomasse . Les problèmes principale de ce type de photo bioréacteur : l'accumulation d'oxygène et de contrôle de température et les problèmes d'encrassement **(Brennan et Owende ,2010).**



Figure 8: photobioréacteur tubulaire
https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Ffigure%2FPhotobioreacteur-tubulaire-Universite-de-Wageningen-AlgaeParc_fig2_267390520&psig=AOvVaw2a33gSIuyFsNeFg7o_opV2&ust=1598884341973000&source=images&cd=vfe&ved=0CAkQjhxqFwoTCPDzrb2Sw-sCFQAAAAAdAAAAABAD.

II.3. Culture individuelle de la spiruline

Grâce à la start-up toulousaine Alg & You, il est désormais possible de cultiver de la spiruline fraîche dans sa cuisine.

À la fin de l'année 2018, les particuliers pourront se procurer un système de production de spiruline à domicile nommée le « Bloom » et commercialisé par la Start up Française

Alg & You.au prix de 480 €, « Bloom se présente sous la forme de trois cuves faisant chacune 3,3 litres, capables de produire chaque semaine entre 50 g et 100 g d'algues »

La première cuve accueille la souche, la deuxième la spiruline en train de pousser, et la troisième sert à réensemencer la prochaine récolte. Cela donne une spiruline onctueuse, au goût incomparable Pour la cultiver, il suffit de mélanger la souche de spiruline et la solution nutritive dans de l'eau. Grâce à la lumière, la chaleur et l'agitation, la spiruline commence sa croissance. La souche de spiruline et la souche nutritive permettent d'avoir une autonomie d'environ 2 mois (environ 9cycles) (**Julie Rimbert 2017)**



Figure 9: Prototype Bloom commercialisé par la société *Alg & You* **(Julie Rimbert 2017)**

II.4. Risques de toxicité liés à la production

Les potentiels risques de toxicité de la spiruline lies à son mode de culture (culture en pleine air) qui est facilement envahie par d'autres microorganismes apportent soit par l'eau (y compris la pluie), soit par l'air : organismes fixés sur des poussières amenées par le vent, des excréments d'insectes, matériel souillé. (**FOX 1999)**

II.4.1. Contamination par des métaux lourds ou éléments traces métalliques

Les phycobiliprotéines de la spiruline possèdent une forte capacité chélatrice qui leur permettant d'attirer les métaux lourds présents dans leur environnement.

Dans plusieurs cas, les toxiques tels que le plomb, le mercure et l'arsenic ainsi que le fluor **(HOCINI 2017)** ont été donnés comme non détectables; pourtant, une étude plus détaillée montre que dans le cas de spiruline récoltée en milieu naturel, les teneurs en arsenic et surtout en fluorures peuvent être relativement élevées (Tableau 1).Ce sont des particularités liées aux compositions géologiques des régions concernées **(Manet ,2016).**

La production artificielle de spiruline aurait pu nous affranchir du risque de sa contamination par les métaux lourds. Puisque les valeurs observées sont en dessous des normes de l'OMS et du FAO. Malgré cela, plusieurs cas ont été relevés, Le risque de contamination dans ce cas de figure peut être lié à la qualité de l'eau de production qu'il est indispensable de contrôler (**Ahounou 2018)**

Tableau 1 : Valeurs moyennes des toxiques minéraux de la spiruline (**Goulamabasse T R 2018)**

Elements	**Moyenne**
Arsenic	0.06-2ppm
Sélénium *	0.01-0.04ppm
Cadmium	0.01-0.1ppm
Mercure	0.01-0.2ppm
Plomb	0.6-5.1ppm
Fluor*	112-630ppm

* Le fluor et le sélénium jouent un rôle essentiel dans l'alimentation humaine, toutefois ils présentent des dangers, en cas de surdoses, que les oligo-éléments.

II.4.2. Contamination par des cyanobactéries et leurs toxines

Les contaminations par d'autres cyanobactéries sont fréquentes, cette contamination apparait dans les débuts de la culture, quand la spiruline est Clairsemée et laisse la lumière pénétrer profondément, ces contamination restent surtout au fond de la culture et meurent quand la culture spiruline devienne plus dense elle les prive de lumière. (**Jackson 1962)**

Certain cyanobactéries sont capable de synthétiser des cyanotoxine et par conséquent, elles peuvent occasionner des perturbations écologique et nuire à la santé des usagers, il existe plusieurs types de cyanotoxines différentes, certaines de ces toxines peuvent causer des irritations de la peau ou des effets allergiques (dermatotoxines). D'autres causent des problèmes au niveau du foie (hépatotoxines). D'autres encore peuvent affecter le fonctionnement du système nerveux (neurotoxines),(dont les anatoxines et la BMAA13: β-N-Methylamino-L-Alaline)largement synthétisées par les cyanobactéries C'est pourquoi il faut éviter tout contact et toute ingestion d'eau présentant un Bloom de cyanobactéries.**(Bernard, 2014).**

II.4.3. Contamination par des bactéries pathogènes

Le pH élevé du milieu de culture empêche la prolifération d'autres espèces et de bactéries pathogènes, et ne leur permet pas de se développer ce qui entraîne une monoculture virtuelle de Arthrospira platensis , cependant une contamination lors des manipulation effectuées pendant sa production est possible .elle principalement liée aux pratiques d'hygiène et à l'eau utilisée. **(Ferhat et Lakehal2019)**

L'étude effectuée sur les bactéries associées à des échantillons de spiruline issue de différentes origines a montré une contamination par des bacilles, des entérobactéries, Streptocoque fécaux, Streptocoque du groupe D, des levures et des moisissures plus rares, des diatomées et des protistes des genre *Stylonichia* et *Spiromonas* . **(Anses, 2017)**

Dans les compliments alimentaire vendus en Europe issus du même fabricant ont été identifiées des bactéries du genre Clostridium excédant les normes admises dans l'alimentation**,(Anses,2017)**

Une étude portant sur 31 échantillons commerciaux vendus sur le marché grec et issus de lieux de production très variés a mis en évidence des contaminations par 469 espèces bactériennes hétérotrophes dont des espèces pathogènes **(Vardaka et *al*. 2016)**

Une contamination bactériennes de spiruline peut se produire lors des manipulations (récolte, lavage, séchage, stockage, conditionnement..)Le risque de contamination de milieu de culture est possible mais peu fréquent. Néanmoins, les contamination a des teneurs excédant les normes alimentaire usuelles semblent rare pour les produit finis, et cela par respectent des règles d'hygiène strictes effectuant des contrôles réguliers sur la conformité de leur culture , sur qualité de l'eau ,et des contrôles de l'absence de bactéries pathogènes et de métaux lourds par des organismes certifiés, possédant un système de traçabilité fiable et recoupant toutes les vérifications indispensables à une qualité irréprochable de la spiruline. Les mélanges d'algues sont à bannir, ces derniers pouvant accroître le risque de toxicité lié à la présence d'autres microorganismes. (**Anses 2017, Ahounou 2018)**

III. LES CONDITION PHYSO-CHIMIQUE DE CROISSANCE

La spiruline est une cyanobactérie se développe naturellement dans les eaux saumâtres, chaudes, douce et alcalines, aux propriétés nutritives très riches. Elle est présente dans les lacs salins (Tchad, Mexique, Chine). (**Niagornan . 2017**)

La spiruline est également cultivée en milieu contrôlé notamment dans les bassins et la photo bioréacteurs sur milieu synthétique et naturelle.

Pour obtenir une donne production de biomasse, il faut assurer des conditions optimales de croissance. La culture de la spiruline se fait dans des condition favorable tel que, l'eau, la température, pH, la lumière, et l'agitation (**Niagornan ., 2017**)

III.1. Les compositions du milieu

La spiruline se vive dans des eaux alcalines et salée. Leur milieu est une solution de sels minéraux et d'eau. Ce liquide est très riche en carbonate de sodium (Na2CO3) ou bicarbonate de sodium (NaHCO3),d'une source d'azote , du fer ,du phosphore ,du potassium ,de soufre et des oligo-éléments nécessaire .Ces produits chimiques jouant le rôle d'engrais pour assurer la croissance de la spiruline sont appelés ''intrants''..**(Boudour A. 2008)**

Le milieu le plus recommandé et utilise dans la croissance de spiruline est le milieu Zarrouk (milieu standard) (Tableau 1,2, et 3). est un milieu qui répond aux besoins de spiruline et donne des rendements de croissance et production de biomasse (**OULD BELLAHCEN al. 2013).**

Le milieu Zarrouk, référence dans ce domaine, présente l'intérêt de s'adapter à presque toutes les souches de spiruline et simplifie considérablement le travail de l'algoculteur. Toutefois, ses constituants sont chers et ne sont pas toujours faciles à trouver **(Jourdan, 1997)**.

Tableau 01 : Composition chimique d'un milieu minérale proposé par Jourdan. (**Jourdan J.P ,2007)**.

Nom de l'intrant	**g /l**
Bicarbonate de sodium	**8**
Chlore de sodium	**5**
Nitrate de potassium	**2**
Sulfate de potassium	**1**
Phosphate monoammonique**0.2**	0.2
Sulfate de magnésium	**0.2**
Urée	**0.02**
chaux	**0.02**
sulfate de fer	**0.005**

Tableau 02: composition chimique de milieu Zarrouk (**Fox ., 1999**)

Composition	**Concentration (g.L^{-1})**
NaHCO3	16.80
K2HPO4	0.50
NaNO3	2.50
K2SO4	1.00
Na Cl	1.00
Mg SO4. (7 H2O)	0.20
CaCl2	0.04
FeSO4. (7H2O)	0.01
EDTA	0.08

Tableau 03 : composition chimique de solution d'oligoélément**A5 (Fox ., 1999)**

Oligo-éléments	**Concentration (g.*L*−1)**
H3BO3	2.86
MnCl2 .4 H2O	1.81
ZnSO3	0.22
CuSO4	0.08
MoO3	0.01

Tableau 04 : composition chimique de solution d'oligoélément B6**(Fox ., 1999)**

Oligo-éléments	**Concentration (g.L -1)**
K2Cr (SO4)4 24 H2O	960 x 10-4
NiSO4.7H2O	478 x 10-4
Ti2(SO4)3	400 x 10-4
NH4VO3	229 x 10-4
Na2WO4	179 x 10-4
Co(NO3)2.6H2O	44 x 10-4

- Dans un litre de milieu de culture (Zarrouk), on ajoute 1 ml de solution d'oligoélément A5, B6

III.2. Les besoins élémentaires de croissance

III.2.1.Eau

L'eau utilisée pour le milieu de culture doit être de préférence potable ou au moins filtrée (sans sentir de chlore), et parfois stérilisée aux UV, le plus important étant l'élimination des algues étrangères pour éviter la contamination durent la culture**.(jourdan j.p , 2014)**

La quantité d'eau nécessaire pour la constitution du milieu initial, il est important de savoir par exemple, qu'une surface totale de culture de 1000 m2 exige un volume supplémentaire d'eau, additionnée pour compenser les pertes d'eaux sous l'effet d'évaporation. (**Cruchot H, 2008)**

Les eaux trop dures sont à éviter car elles peuvent gêner la culture en formant des boues minérale. (**BelayAet al, 1996)(Qishen P, 1988)**
La conduite de bassins de culture nécessite un minimum de ressources en eau. Les eaux de pluie sont intéressantes car propres et neutres (pas de minéraux en Solution). (**Scheldeman P, 2005**)

III.2.2.Alcalinité et salinité :

Les limites de salinité et alcalinité permises sont généralement assez larges (salinité totale de 13g /l, et d'alcalinité 0.1g/l)**(Jourdan,1997)** .

L'alcalinité est habituellement apporté par du bicarbonate de sodium, mais ce dernier peut être remplacé en partie par de la soude caustique ou du carbonate de sodium pour relever le pH initiale de milieu de culture à une valeur de 9.

La salinité est apportée par les produits chimiques servant d'engrais et complétée par du chlorure de sodium. **(Cruchot H, 2008)**

III.3. les besoins nutritionnelles

La spiruline a également besoin pour sa croissance des éléments suivant : carbone (C) ,azote (Z), potassium (K), calcium(Ca), magnésium (Mg),fer (Fe) ,soufre (S)et phosphore (P). **(Xin et *al* . , 2010 in Nyabuto et *al* ., 2015)**

III.3.1.la source d'azote :

La spiruline contient 12 % d'azote en poids sec. L'atmosphère en contient 78 %. Cet azote n'est généralement pas utilisable pour la photosynthèse. Les sources naturelles d'azote pour la spiruline sont l'ammoniac et l'urée. Le plus souvent est utilisé un nitrate qui n'est pas toxique à forte concentration.

L'urée (NH2)2CO est plus commode à utiliser que l'ammoniac. La qualité commerciale de l'urée utiliser comme engrais, en petites grains blancs comme des perles, convient très bien .il doit être ajoute à petites doses pour évite la toxicité et l'évaporation de l'ammoniac ; la concertation de l'urée doit en être limite à environ de 0.1 g /l. (**FOX ., 1999 .Sialve B., Steyer J-P. 2013*)***

III.3.2. la source de carbone :

La nourriture principale de la spiruline est le carbone. La spiruline contient 47%de carbone, il en faut donc un apport important pour obtenir une croissance rapide. Dans les lacs naturel, le carbone provient soit de carbonate volcanique, soit de gaz carbonique atmosphérique. La source naturelle de carbone pour la spiruline est le gaz carbonique atmosphérique. Le CO2 gazeux est mis se forme dissoute ou liquide. **(Fox ., 1999)**

III.3.3.la source minérale

Les minéraux spécialement intéressants chez la spiruline sont le fer, le magnésium, le calcium, le phosphore et le potassium.

Ces éléments, naturellement doivent existe dans le milieu nutritive pour cultiver la spiruline et assures la croissance. On peut les trouver dans les produis chimique industriels, des effluents organiques ou du sel marin **(Fox . ,1999).**

- **Fer :** se trouve dans le groupe ((Herne)) de protéine à pigment appelée le cytochrome qui transfère les électrons dans la chaine photosynthétique de formation des molécules organiques.
- **manganèse :** est un donneur d'électrons à la base de l'échelle d'énergie dans la photosynthèse.

- **calcium** : le calcium intervient dans la synthèse des protéines à partir des nitrates.
- **phosphore :** est un composant de la molécule NADP+ et accepteur d'énergie dans la photosynthèse.
- **potassium et sodium :** le potassium et le sodium interviennent dans la régulation de la pression osmotique (passage des liquides à travers la membrane et la paroi de la cellule). Un mécanisme de pompe ionique consommateur d'énergie maintient la concentration du potassium dans la cellule plus élevée que celle de sodium .La mort stoppe ce mécanisme et le rapport K/Na tombe vers l'équilibre. Le sodium est un activateur d'enzyme. **(FOX ., 1999)**

III.4.Paramètres physiologiques

III.4.1.Température du milieu

La température du milieu de culture influence directement la vitesse de croissance de la spiruline. Au dissous de 20 c°, la croissance et la multiplication est arrêtée. La vitesse de croissance est maximale entre 35 et 37 c°. Au-delà de cette température, on risque d'avoir une destruction de la culture (qui survient après quelque heure au –delà de 43 c°) .la spiruline peut résiste dans un milieu froid (jusqu'à -5 c°). Dans les zones froides les bassins de cultures doivent être recouverts de serre **(Jourdan ,2018 .Ahounou.2018)**

La spiruline présente une croissance optimale à 35c°. Nous savons que nous perdons de biomasse pendant la respiration. Cette perte est plus grande si l'eau est plus chaude.

Si la température nocturne est basse, il y a peu de perte de la biomasse produite pendant le jour. Le mieux serait une nuit froid et un réchauffement immédiat de l'eau lever de soleil pour avoir une photosynthèse maximale pendant le jour. **(Fox ., 1999)**

III.4.2.pH du milieu

La spiruline demandant un milieu alcalin .Le pH doit être compris entre 8-11, et le pH optimum pour la croissance de la spiruline est autour de 9.5.S'il est trop bas la culture risque de mal démarrer, avec formation de grumeaux ou précipitation de la

spiruline au fond **(Fox 1999).** Par contre si le milieu neuf doit servir d'appoint à une culture existante son pH peut être de 8, ce qui contribue à maintenir de pH bas de la culture et de proche de 9.5 par un apport de bicarbonate. Quand le PH dépasse 10.5 l'apport de CO2 est un suffisant pour compenser le prélèvement par les algues et la culture est dite limitée par le CO2, L'apport par le CO2 abaisse le pH et fournit du carbone pour continues la croissance.

Le pH du milieu joue un rôle important dans les activités métabolique des spirulines, il affecte fortement la production de biomasse, la dissociation de produis chimique et la physiologie cellulaire **(Ogbonda et *al* ., 2007 in Sharma et *al*., 2014 ,Celekli et *al* .,2009 in Sharma et *al* ., 2014).**

III.4.3. agitation de milieu de culture

Les fréquences d'agitation varient suivant le mode d'agitation, les conditions de culture et de la souche cultivée

Elle est nécessaire pour assure une bonne culture, au moins occasionnellement (2-4 fois par jour), elle permet une dispersion homogène de la spiruline dans le milieu qui est un bon moyen pour éviter la photolyse des filaments de spiruline, elle favorise les échanges gazeux (l'élimination de l'oxygène et l'absorption de gaz carbonique) et son exposition à la lumière. **(Jourdan, 2014).**

Une agitation trop violente endommage la spiruline et provoque l'apparition de mousse, l'agitation peut se faire manuellement, ou par l'intermédiaire de roues à aubes.(**jourdan,1999)**

Il existe plusieurs façons d'agiter un réacteur ; les réacteurs dits agités peuvent l'être par des moyens mécaniques (différents types de mobiles d'agitation sont mus par un moteur) ou pneumatiques (par injection de gaz).

III.4.3.1.Injection de gaz

L'agitation non mécanique est l'agitation par bullage. Ce Consiste à injecter du gaz sous forme de bulles en fond de réacteur appelé colonne à bulles, la population de bulles induit les mouvements complexe de la phase liquide (**ARTU 2016)**

Ce système est le moins couteux et le plus basique, permet de l'aération fortement de milieu, ainsi il permet de favoriser le transfert de l'oxygène dissous de la phase liquide vers la phase gaz, ce qui réduit le risque d'inhibition de la croissance liée à une trop forte concentration en oxygène dans le milieu de culture.

enfin il doit être prévu un système d'évacuation des gaz (évents), puisque dans les zones dépourvue de gaz peut entraine une zone de salissure où s'accumulent les cellules mortes propices aux développements bactériens par l'éclatement des bulles en surface. (**Erell Olivo2007).**

La mise en circulation par système mécanique peut se faire via une pompe de recirculation, une hélice marine, une roue à aubes ou encore par agitation manuelle en fonction de l'application et de la géométrie du système de culture utilisé.

III.4.3.2.Agitation mécanique

III.4.3.2.1. Pompe

Les pompes Permettent de connecter les unités de photobioreacteurs entre elles, elles sont insérées dans les canalisations, sont largement dispositifs en mise en circulation externe qui peuvent avoir un effet néfaste sur les cellules, en particulier celles sensibles aux stress hydrodynamiques **(Jaouen *et al.* 1999;Vandanjon *et al.* 1999).**

III.4.3.2.2. Mobiles d'agitation

Les mobiles d'agitation (hélice, turbine) sont des dispositifs technologiques internes d'agitation mis en rotation par des moteurs. Quel que soit leur forme et leur diamètre. Ces dispositifs sont utilisés dans les photobioréacteurs cylindriques verticaux ou horizontaux, **(Chisti et Moo-Young 2001).**Les agitateurs axiaux et radicaux génèrent une forte turbulence un cisaillement important et entrainent également la formation de vortex, un vortex puissant dans la solution par application d'un mouvement orbital rapide, c'est pourquoi ils sont généralement utilisés en présence de contre pales qui viennent briser l'écoulement tangentiel.

Les turbines sont efficaces pour homogénéiser le milieu (mouvement de convection) mais ne permettent pas généralement d'éviter la formation de dépôts (salissures) en parois.

les hélices marines de large diamètre sont utilisés à des vitesses de rotation faibles **(Chisti et Moo-Young 2001).** Dans le cas de cultures de cellules sensibles à l'hydrodynamique. Cependant, pour les grands volumes ,il est nécessaire d'augmenter la vitesse de rotation des hélices pour vaincre les pertes de charges (photobioréacteur tubulaire) ce qui n'est pas toujours bien supporté par tous les microorganismes **.(Erell Olivo2007).**

les mobiles à débit axial, qui créent une circulation du fluide du haut vers le

bas. les mobiles à débit radial qui créent un écoulement radial perpendiculairement à l'arbre de rotation.(**Marie Debacq.2019)**

Et enfin, le choix d'un système d'agitation est conditionné par le volume de culture et par la géométrie du photobioréacteur pour une utilisation spécifique (.**Erell Olivo2007)**

III.5. CINETIQUE ET MESURE DE CROISSANCE

III.5.1. Détermination de concentration de biomasse

Plusieurs méthodes utilisées pour suivre la cinétique de croissance telle que le disque de Secchi, le poids sec et la mesure de densité optique des cultures.

III.5.1.1.Méthode de Disque de Secchi

La concentration d'une culture peut être évaluée par l'intensité de sa couleur.
On utilise pour cela un " disque de Secchi ":il s'agit d'une règle graduée de 30 cm de longue à l'extrémité de laquelle se trouve fixé (perpendiculairement) un petit disque blanc de diamètre compris entre 30 et 40 mm.. On plonge cet instrument dans la culture, jusqu'au point où le disque cesse d'être visible. La profondeur du disque est alors lue sur la règle graduée. Si le disque de Secchi reste visible au-delà de 5-6 cm de profondeur la concentration de biomasse est diluée .il est nécessaire de faire une dilution si les valeurs indiquent sont inférieures à 2 cm .une valeur de 2-3cm correspond à une culture prête à la production. **(Flaquet.1996).**

III.5.1.2. Méthode de Densité optique

La biomasse de spiruline a été déterminée en mesurant la densité optique (DO) à un longueur d'onde spécifique (λmax) on utilisant d'un spectrophotomètre. (**Zarrouk, 1966)**

Cette méthode est basée sur la loi de Beer - Lambert exprimé par l'équation suivante

Absorbance = εlc

Avec:

- A : absorbance
- ε: le coefficient d' absorption molaire en $L.mol^{-1}.cm^{-1}$
- l : la largeur de cuve en cm
- c : la concentration de la solution en mol/L

III.5.1.2.1.la méthode de poids sec

La concentration de biomasse est suivie par la mesure de la densité optique à λ max =618 nm par spectrophotométrie (spectrophotomètre UV mimi 1240 SHIMATZU). Une courbe d'étalonnage est établie à partir des valeurs des densités optiques et les concentrations en poids sec de la culture. A partir d'une culture dense, on prépare une série de dilution de culture (en moyenne 5) et on détermine les densités optiques des différentes dilutions réalisées.

Le poids sec des cultures est déterminé selon la méthode de (**vanshak 1982)** :

- Les échantillons contenant 25- 50 ml de suspension d'algues sont filtrés à travers un filtre Whatman (n°4 - 47 mm de diamètre) séché, au préalable, dans un four pendant 24 h ou pendant une nuit à 70 °C et pesé avant la filtration (P_0) ;
- Les filtres sont lavés avec 20 ml d'eau acidifiée (pH 4) ;
- Ils sont placés, ensuite, dans des boîtes de pétri en verre dans le four pour une durée de 24 h à 70 °C ;

- Après avoir refroidi le filtre dans un dessiccateur (20 min), il est pesé de nouveau (P1). Le poids sec est calculé selon l'équation ci-dessous :

$Ps = (P_1 - P_0)/V$……. (1)

Où :

Ps : poids sec de la biomasse,

P_1 : poids chargé de filtre,

P_0 : poids vide du filtre,

V : volume filtré de culture.

III.6. Les paramètres cinétiques de croissance

La spiruline se développe dans un milieu de culture contient des conditions favorable pour donner une croissance optimal. L'étude de la croissance de la spiruline reliée à des paramètres cinétiques suivants : Umax (le taux de croissance), temps de croissance et le rendement.

III.6.1. Umax et Temps de croissance

Le taux de croissance spécifique intervient dans les descriptions des évolutions de la croissance de la spiruline en fonction du temps et de l'intensité lumineuse. Pour décrire la relation entre les Différentes intensités lumineuses et le taux de croissance spécifique des algues, le modèle Monod modifié est adopté.

Le Taux de croissance spécifique maximale ou la vitesse de croissance (Umax) correspondant au nombre de division cellulaire pour temps de croissance, il était le taux de croissance spécifique pendant la phase exponentielle de croissance. Umax calculé à partir l'équation suivante **(Falquet et Hurni., 2006)**

$$\mu_{\max} = \frac{\ln X_2 - \ln X_1}{(t_2 - t_1).\ln 2} = \frac{1}{(t_2 - t_1).\ln 2} \ln\left(\frac{X_2}{X_1}\right)$$

X 1 : la concentration en biomasse en début de phase exponentielle.

X 2 : la concentration en biomasse en fin de phase exponentielle.

t : la durée de la phase exponentielle.

III.6.2. calcule de rendement

Le rendement est un indice de l'efficacité de conversion des éléments nutritifs en matériel cellulaire.

Le Rendement de conversion d'un substrat S en biomasse X égale le rendement de croissance , et appelons **Y x/s** le rendement instantané de croissance (Y pour yeild = rendement en anglait) .
Y x/s s'exprime en « quantité de X formé par quantité de S de consommé (Par exemple en g de biomasse par g de S).

Y x/s dépend a priori des conditions physiologiques à instant **t** de culture.
Ainsi, si **S** est la source de carbone et d'énergie d'un milieu (du glucose par exemple) ,Y x/s plus élevé en phase exponentielle (S utilise comme source de carbone et d'énergie pour la croissance et la maintenance) qu'en phase de ralentissement proche de la phase stationnaire (S est utilisé comme source de carbone et d'énergie pour une maintenance « rallongée » accompagnée de peu d'utilisation vers la croissance) .

Le rendement calcule à partir d'équation suivante :

Y x/s = d (*qté de X* produite) / d (*qté de S* consommé)

R = Y x/s = Xf - X0 / S0 - Sf

Tel que :

Xf : la concentration finale de culture.

X0 : la concentration initiale de culture.

S0 : la concentration initiale du substrat.

Sf : la concentration finale du substrat.

VI. LES FACTEURS DU MILIEU et CROISSANCE DE SPIRULINE

La spiruline est une micro algue riche en nutriment qui peut être influencer par les différents conditions de culture, donc , pour une bonne biomasse il est nécessaire de l'optimisation de toutes les conditions de culture , température , intensité de lumière , pH , phosphore , le carbone , l' azote , agitation

Ont cherché à savoir comment une combinaison d'un ensemble de paramètres, qui conduit à la production maximale de biomasse, chlorophylle a et protéines. En manipulant les conditions environnementales de la croissance des algues, on peut modifier la production de biomasse.
Les spirulines se développent dans des milieux notamment minéraux qui contaient tous les éléments nécessaires pour le développement et la production optimale. Ils montrent une vitesse de croissance très importante dans les milieux minéraux **(Flaquet et Hurni, 2006)**

La production et la croissance de spiruline est influencée par plusieurs facteurs du milieu, les productivités maximales de biomasse sont obtenus dans des conditions optimales de croissance**. (Charpy. 2008)**

VI.1.Effet de l'azote

L'azote compte pour 7 à 10% de la composition de la biomasse. C'est un élément indispensable au métabolisme cellulaire qui intervient notamment dans la synthèse de protéines fonctionnelles et structurelles. Il est assimilés préférentiellement sous les formes ammonium (NH_4^+) et nitrate (NO_3^-), mais le nitrate et l'urée pourront également réponde aux besoins d'azote **(Becker 1994).**la consommation de nitrate a pour effet d'augmentation le pH tandis que l'assimilation de l'ammonium provoque sa diminution .

Les cyanobactéries transforment l'azote moléculaire atmosphérique en composés tels que l'ammoniac, qui sont en parties directement transformés en protéines, en acide aminés et autres cellules contenant de l'azote **(Barsanti et Gualtieri , 2006)**

L'ammoniac est directement utilisé pour synthétiser les acides aminés tandis que les autres sources d'azote doivent être converties en ammoniac pour synthétiser l'acide aminé.(**Junyinget et *al* ., 2013 in Nyabuto et *al* ., 2015**). L'ammoniac peut être absorber directement et facilite la chimie de la cellule car la transformation de NO3 en NH3 dans la cellule n'est plus nécessaire**.(Fox ,1999)** . La source et la concentration d'azote affectent, également l'accumulation de lipides dans la spiruline **(Xin et *al* ., 2010in Nyabuto et *al* ., 2015).**

Certaines algues bleues (cyanobactéries) peuvent fixe l'azote de l'air pour faire de l'ammoniac NH3, grâce à l'enzyme Nitrogénase produit dans les cellules spécialisées, les hétérocystes. La spiruline n'a pas d'hétérocystes et ne fixe pas l'azote atmosphérique, L'azote fixé est nécessaire pour la croissance de la spiruline. la source la plus facile à employer est le nitrate, de sodium ou de potassium (NaNO3 ou KNO3) **(Fox, 1999) .**

(**Spoehr et Milner 1949)** décrient que le contrôle des apports azotés constitue le mode de régulation le plus efficace et le plus employé pour réguler la synthèse et le stockage de composés organiques de réserve dans la cellule : lipides , sucres et pigments .

VI.2. Effet de carbone

VI.2.1.Fixation de CO2

Le carbone est un constituant majeur des microalgues **(Van den Hende et *al* ., 2012)** La spiruline utilises le gaz carbonique atmosphérique (CO2) comme source de carbone.

La fixation du CO2 entraine principalement la formation de biomasse structurelle des cyanobactéries, de plus, la concentration élevée en bicarbonate - carbonate favorise la productivité élevée observée dans l'habitat naturel d'Arthrospira **(Whitton et potts , 2000).**

Le gaz carbonique de l'atmosphère se fixe très facilement sur le saumures à pH élevé durant la nuit en particulier pendant laquelle la photosynthèse ne fonctionner pas, et

ainsi se rétablissent les conditions optimal de production du milieu de culture de la spiruline **(Doumenge et *al* ., 1993) .**

VI.2.2.l'effet de source Carbonique organique sur la croissance de spiruline tel que : le glucose, le fructose, la mélasse et l'amidon

Les glucides représentent 15 à 25% de la matière sèche des spirulines. La spiruline est la capacité d'assimiler directement du carbone organique produit par d'autres organismes. Dans cette voie hétérotrophe, l'incorporation de carbone dans la cellule est plus coûteuse d'un point de vue énergétique et entraîne des taux de croissance plus faible. **(Bumbak *et al*., 2011).**

Les substrats organiques « simples » préférentiels sont le glucose et fructose. Bien plus intéressants d'un point de vue économique, les mélasses et effluents d'activité sucrière et laitière ont été également utilisés avec succès **(Bumbak *et al*., 2011).**

La spiruline est utilisé les glucides (le glucose, le fructose, mélasse et l'amidon) dans leur croissance comme des sources de carbone et d'énergie.

Pour avoir l'effet de ces source carbonique organique, plusieurs expérience utilise en différentes concentration de (glucose, fructose ; amidon et la mélasse) pour avoir et contrôlée la productivité et la croissance de spiruline.

La production de biomasses obtenues à différentes concentrations de mélasse .donc Les valeurs de la productivité sont augmentées avec l'augmentation de concentration de mélasse dans le milieu. . Alors la mixotrophie en utilisant les glucides (mélasse) comme source de carbone et d'énergie favorise la croissance. (**Sialve B .,steyer j-p.2013)**

Pour l'effet de concentration de mélasse sur la chlorophylle a, le taux de chlorophylle a augmenté proportionnellement avec l'augmentation de concentration de mélasse dans le milieu jusqu'à la concentration de 0.5 g/l, puis diminue pour les concentrations 0.75g/l et 1g/l de mélasse, cela peut être due au milieu alcaline où 1g

de mélasse a un effet répressif sur la réaction de photosynthèse et l'accumulation de la chlorophylle a. (**Dineshkumar et *al* .2015).**

Pour l'effet de la mélasse sur la teneur en lipides :

La teneur lipidique de la spiruline augmente proportionnellement avec l'augmentation de source de carbone (mélasse) dans le milieu avec une accumulation maximale des lipides 18.84%. qui correspond à 1g/l de la mélasse **(Antonio.A Martins ,2016)**

Pour l'effet de différentes concentrations de glucose, fructose et l'amidon sur la croissance de spiruline :

le glucose est le mieux adapté pour la croissance de spiruline qui donne une production de biomasse plus élevée **(Ogawa et *al,* 1981),(Marquez et *al*., 1995) (Chen et *al*., 2009**).

Pour la croissance optimale de la spiruline peut être expliqué par l'effet de glucose et fructose parce qu'ils sont des sucre simple rapidement assimiler et facilement biodégradable par la spiruline, donc la productivité est maximale lorsque la valeur de glucose est entre 2.5-4.5 g/l.

La mélasse est un composé complexe qui contient du raffinose (tri saccharide), des pigments et des minéraux donc il prend un peu plus du temps pour être dégradé par la spiruline. Donc la productivité est influencée selon la quantité de mélasse qui contient dans le milieu. S'augmente si la valeur de mélasse est entre 0.25- 0.75g/l.

La productivité est augment lorsque la valeur d'amidon est inférieure à 0.75g/l a cause de l'amidon est un glucide difficilement soluble ayant une structure complexe, (polysaccharide ramifié).

La mixotrophie se définit comme la capacité des organismes à assimiler à la fois du carbone inorganique et du carbone organique. Le taux de croissance spécifique global sera sensiblement égal à la moyenne des taux de croissance obtenu dans les deux types trophiques. Cette propriété métabolique avantageuse est exploitée dans les filières industrielles de production de microalgues et de co-produits à haute valeur ajoutée. **(Sialve B.1, Steyer J-P. 1., 2013)**

VI.3. Effet de phosphate

Le phosphore est un composant de la molécule NADP+ et un accepteur d'énergie dans la photosynthèse. **(Fox , 1999)**

Le phosphore représente 1% environ du poids sec de cellule. Il intervient pour l'essentiel dans le transfert d'énergie (ATP), la synthèse des acides nucléiques et la formation de la membrane cellulaire.

La forme Orthophosphate (PO_4^{-3}) est préférentiellement assimilée. Dans le milieu de culture, le phosphore est souvent considéré comme limitant. Sous forme ionique, il va en effet former des complexes avec la plupart des cations métalliques. Dans certains conditions (de pH notamment) ,) , il n'est alors plus assimilable par les cellules si la valeur de PH est moins de 4 , Comme pour l'azote, la régulation des apports en phosphore est également un moyen de contrôler le stockage du carbone organique intracellulaire. **(Sialve B.1, Steyer J-P. 1., 2013).**

Le phosphore est apporté indifféremment par n'importe quel orthophosphate soluble, Par exemple le phosphate monoammonique (NH4H2PO4), le phosphatedipotassique (K2HPO4) ou le phosphate trisodique (Na3PO4, 12 H2O), ou encoreL'acide phosphorique. **(Jourdon ., 2006).**

Le phosphore est un élément nécessaire dans le milieu de culture de la spiruline pour assurer la croissance, Lorsque le milieu contient simultanément les ions ammonium (NH4), magnésium (Mg) et phosphate (PO4), les concentrations de ces ions sont parfois (selon les concentrations et le pH) interdépendantes parce que la solubilité du phosphate mixte d'ammonium et de magnésium est extrêmement faible. Le phosphate mixte insolubilisé reste tout de même disponible pour la spiruline puisqu'il se redissout dès que les conditions le lui permettent, mais s'il y a déséquilibre les concentrations d'un ou deux des trois ions impliqués peuvent être très faibles, ce qui ralentit la croissance et peut même faire mourir la culture (aussi bien par manque de magnésium que de phosphate). Les cristaux de phosphate mixte se déposent normalement avec les boues, mais il arrive qu'on en trouve en surface dans certaines conditions et même parfois dans la spiruline récolté **(Jourdan ., 2006)**

Lorsque le pH d'un milieu en cours de préparation à partir de bicarbonate et d'eau calcaire doit être relevé par ajout de soude, il est important de n'ajouter le phosphate qu'après la soude pour éviter la formation d'un précipité en flocons décantant très difficilement ou même ayant tendance à flotter **(Jourdan ., 2006)**

De même le potassium peut être apportéin différemment par le nitrate de potassium, le chlorure de potassium, le sulfate ou le phosphate dipotassiques. La source de magnésium habituelle est le sulfate de magnésium appelé sel d'Epsom (MgSO4, 7 H2O). Le calcium éventuellement

Nécessaire est apporté par un peu de chaux éteinte ou de plâtre (sulfate de calcium), ou, mieux, d'un sel de calcium soluble (nitrate, chlorure); il faut en mettre de quoisaturer le milieu en calcium à pH voisin de 10, mais pas plus, c'est-à-dire jusqu'à formation d'un légère louche blanc. En cas d'ensemencement d'une nouvelle culture avec peu de spiruline, mieux vaut s'abstenir d'ajouter du calcium au début pour éviter de perdre de la semence entraînée dans les boues minérales**.(Jourdan ., 2006)**

VI.4.l'effet l'azote et la photosynthèse

La photosynthèse est une source d'énergie (ATP), de pouvoir réducteur (NADPH) et de squelettes carbonés pour assimilation de l'azote.

La source d'azote minéral pour la spiruline est les nitrates (NO3-), ammonium (NH2).

Les nitrates sont réduits en nitrites, puis en ammonium sous l'action de deux enzymes: la nitrate réductase et le nitrite réductase; selon les plantes et selon leur stade de développement.

La photosynthèse est tubutaire de l'assimilation de l'azote pour la fabrication des molécules ou de structures essentielles : la chlorophylle qui capte l'énergie lumineuse, les membranes Chloroplastique ou se fait la séparation des charge, les enzymes des voies carboxylation et de toutes les étapes métabolique. (**Marie-Esther Deroche 1983)** .

les effets des carences en azote sur la photosynthèse et l'intervention de l'ion NH4+ dans les mécanismes primaires et les réactions enzymatiques photosynthétiques sont très étudiés **(Aparicio et Maldonado , 1979)** ; (**Hewitt et Coll ., 1979)** ont traités que de la régulation de l'assimilation des nitrates **(Jones et Sheard , 1979)** ont fait une mise au point sur l'intervention de la lumière dans l'assimilation de l'azote **(Cresswell et Coll ., 1979)** sur la régulation du métabolismes carbonés .

Pour illustrer la dépendance de la photosynthèse vis –à- vis de l'assimilation de l'azote, nous donnons quelques exemples à différents niveaux de complexité.

La molécule de chlorophylle qui capte la lumière contient 4 atomes d'azote par molécule ; sa biosynthèse commence par analogue d'acide aminés : le aminolévulinate .

Les membranes chloroplastiques sans lesquelles la séparation des charges ne pourrait pas se faire, sont composées par moitié de protéines et de lipides. Les galacto-lipides, lipides majeurs et spécifiques des chloroplastes sont synthétisés par le chloroplaste ; toutes ces biosynthèses sont catalysées par les enzymes, donc les protéines. Les molécules synthétisées à l'extérieur et à l'intérieur de l'organite chlorophyllien sont assemblées pour fabriques les membranes.

Les enzymes de carboxylation, de même que toutes les enzymes qui catalysent les réactions décrites sont les protéines, donc les molécules avec azote.

L'azote doit être utilisé avant tout pour synthétiser des molécules liées à la lumière et des protéines collectant la lumière dans le système photosynthétique, de plus, afin d'évaluer si le contrôle d'autres composants dans le milieu a une influence positive ou négative sur la production d'Arthrospira platansis

3-la spiruline utilise le carbone atmosphérique (CO2) comme source de carbone, le CO2 est combiné avec la lumière dans la photosynthèse.

La photosynthèse est l'édification de matériaux organique par les plantes, utilisant l'énergie lumineuse comme outil, pour séparer, combiner et réarranger les molécules, les atomes, et des particules automatiques. **(Fox, 1999)**

Parmi ces substances : le gaz carbonique (CO2) et l'eau (H2O). La réduction d'une molécule de gaz carbonique et la libration consécutive d'une molécule d'oxygène nécessitent plusieurs quanta d'énergie (huit) et constituent les étapes fondamentales de la photosynthèse**. (Fox, 1999)**

VI.5. Effet de la lumière

La lumière est un facteur important dans la croissance des micro-algues, elle nécessaire pour la photosynthèse. Une limitation ou un excès la lumière peut donc

avoir des conséquences sur la métabolise des cellules (décomposition de cellules) et de leur croissance, donc la qualités et la quantité de lumière influencent la croissance et la physiologie de la spiruline **(Niangaran, 2017)** . On avoir des relations entre la lumière et les autres facteurs de milieu qui assurer la productivité de la spiruline.

VI. 5.1. La lumière et l'agitation

L'effet de l'agitation sur la culture en masse des micro-algues est encore peu étudié tant au niveau des aspects fondamentaux que techniques du Problème, même si très tôt des études ont montré son action positive sur la Productivité algale **(WINOKUR, 1948)**. En effet, l'agitation évite :

- la sédimentation des cellules algales **(OSWALD, 1988).**
- la présence de gradients gazeux et nutritionnels dus à l'activité métabolique.
-une disparité de l'énergie lumineuse reçue par les individus.

L'agitation est relié avec la lumière , donc , une intensité lumineuse élever sans agitation conduit à une photolyse ou destruction par l'effet photoélectrique (les électrons sont ébullition) .Une forte intensités lumineuse avec une forte agitation donne la croissance optimal **. (Fox. , 1999)** . Le seuil de l'agitation pneumatique optimal est 150 à 300 L/heure.

Pour les fortes intensités lumineuses, la photo inhibition diminue ou disparaît **(Raven, 1988).** Pour les faibles intensités lumineuses, avec un point de compensation proche de la surface, la mince couche d'eau productive d'un milieu non-agité est remplacée par une colonne d'eau homogène avec une forte production.

VI.5.2. Effet de la lumière et de biomasse

Pour la culture phototrophe, l'intensité lumineuse influence non seulement fortement la croissance cellulaire des microalgues, mais modifie également les niveaux de molécules liées à la lumière dans le système photosynthétique (**Markou et *al*., 2012; Xie et *al*., 2013**). Pour étudier l'effet de l'intensité lumineuse sur la croissance cellulaire et la production d'Arthrospira platensis, différentes intensités lumineuses

ont été examinées. à la fois la productivité de la biomasse et le taux de croissance spécifique d'Arthrospira platensis ont augmenté de manière significative lorsque l'intensité lumineuse a été augmentée. Cependant, une forte diminution a été observée lorsque l'intensité lumineuse était encore augmentée. **.(pandey, et *al*., 2010)**

La croissance des microorganismes (microalgues), et donc la production de biomasse, dépend de la quantité de lumière reçue par chaque microalgue.

Deux facteurs sont à distinguer :

- d'une part, la quantité et la qualité de la lumière émise par le dispositif d'éclairage (intensité, spectre d'émission des sources lumineuses et nombre de ces sources).
- d'autre part, la quantité et la qualité de la lumière réellement disponible pour les microalgues au sein du photobioréacteur : celle-ci étant différente du flux lumineux incident du fait des pertes par absorption et diffusion qui ont lieu en traversant la culture et les parois du réacteur.(**Erell OLIVO2007)**

Comme la lumière est importante pour la photosynthèse de Spirulina platensis, différentes intensités lumineuses telles que 3 Klux, 3.5 Klux, 4 Klux, 4.5 Klux et 5 Klux a été réglée pour le test d'intensité lumineuse **Tableau 1**(La culture a été préparée dans des flacons et inoculé avec des concentrations égale de biomasse de spiruline platensis en Zarrouk modifié de 500 ml médias. Récolte ultérieure pour l'estimation de biomasse a été faite après 20 jours de croissance. (**pandey, et *al.*, 2010)**

Tableau 1 : Effect of différent light intensity on biomass production of Spirulina platensis**.(pandey, et al., 2010)**

S.No	Intensité lumineuse	Poids sec in g/500ml (Mean±sem)	Chl a content in mg/g (Mean±Sem)	Protein content in % of dry wt (Mean±Sem)

1	3klux	0.60±0.020	14.2±0.076	59.2±0.065
2	3.5klux	0.68±0.035	13.3±0.045	61.2±0.086
3	4klux	0.73±0.076	11.4±0.038	63.4±0.076
4	4.5klux	0.75±0.089	11.6±0.075	60.5±0.039
5	5klux	0.85±0.030	9.8±0.074	64.3±0.035

La durée, l'intensité et la qualité de la lumière sont les facteurs les plus importants du succès de la photosynthèse de spiruline. La synthèse de divers composants cellulaires est influencée par l'intensité lumineuse notamment des constituants lipidiques **(Belkoura ,et *al* ., 1997).** Sorokin et al. (1965) avaient rapporté qu'une augmentation de l'intensité de lumière favorise d'abord la division cellulaire et stimuler la photosynthèse, puis, après que l'intensité lumineuse optimale a été atteinte, une nouvelle augmentation de l'intensité lumineuse inhibe la photosynthèse **Dubey (2006)** et donc le ralentissement de la division cellulaire.

Sous l'effet de photolyse, la spiruline est tuée en quelques secondes si elle est exposée à un fort en soleillement , Sa forme en spirale est un mécanisme d'autodéfense afin de créer plus de zone d'ombre.(**Lecointre Robin2017)**

Le résultat suggère qu' une intensité lumineuse élevée est à l'origine de la photolyse, donc la concentration en biomasse est plus élevée lorsque le temps d'éclairage est optimal. (**pandey, et *al* .,2010)**

Le Chlorophylle et la teneur en protéines est de 9,8mg / g et 64,3% à une intensité lumineuse de 5 Klux. Cependant, la teneur en chlorophylle a est maximale à 3 Klux, qui est de 14,2 mg / g,

On peut interpréter la réduction de contenue chlorophylle de Spiruline , comme réponse adaptative contre l'élévation de l'intensité lumineuse dans la culture, on renduisant le taux de chlorophylle pour éviter l'excès d'énergie lumineux véhiculé vers le centre de réaction de photosystème II , cela permettre une diminution du transfert d'énergie entre les antennes collectrice tel que phycobilisomes vers le PSII, et réduirait la portée de l'énergie d'excitation, cette dernière est la cause principale de

destruction de photosystème II même si la radiation ne dépasse pas les seuils de saturation **(Richmond .2004)**

L'intensité lumineuse appliquée au réacteur doit être adaptée à la croissance cellulaire afin d'atteindre une concentration cellulaire élevée, après quoi la lumière sera réduite pour favoriser l'accumulation de chlorophylle.

En conclusion, une réduction de l'intensité lumineuse de la culture de S.platensis comme source peut être utile pour augmenter la production de chlorophylle par ce micro-organisme**.(Danesi et *al* .,2004)**

La concentration initiale de biomasse (IBC) est un facteur important qui affecte la viabilité et la productivité des microalgues en culture par lots. Ainsi, l'effet de l'IBC sur la croissance cellulaire et la production d'Arthrospira platensis a été étudié, Le taux de croissance spécifique maximal d'Arthrospira platensis a diminué de manière significative avec une augmentation de l'IBC. **(Youping Xie. et *al* 2015)**

En conclusion , Chez de nombreuses espèces d'algues, sous l'effet de facteurs tels que l'intensité lumineuse **(Harrison et *al*. 1990, Renaud et *al.* 1991),** la qualité de la lumière, la nature et la concentration de la source azotée **(Piorrecket *al*. 1984, Harrison et *al.* 1990)** ~~et~~ l'effet de carbone et phosphore Cette multitude de travaux démontre, que l'optimisation de croissance de spiruline passe nécessairement par une connaissance approfondie des interactions de l'ensemble de ces facteurs sur leur production.il faut aussi Connaître la composition chimique normale du algue non limité(par exemple C: N: P par atomes) et le rapport de ces éléments dans le milieu de croissance, il est possible de déterminer quel élément limitera la croissance en premier, et quel sera le rendement cellulaire lorsque la limitation des nutriments commence. Cela a l'avantage supplémentaire de réduire le risque de culture, cela insister sur l'importance de savoir comment les nutriments (N, C ou P) ou la limitation de la lumière affectent la valeur nutritionnelle de spiruline.(**Harrison et *al*. 1990).**

Conclusion

Conclusion

Arthrospira platensis , connue sous l'appellation « spiruline » est une microalgue produite et commercialisée dans différentes régions du globe, depuis les années quatre-vingt. Elle se caractériser par sa richesse exceptionnelle en protéines, en vitamines et en oligoéléments.et qui constituer une source potentielle d'actifs biologiques pour l'industrie pharmaceutique, agroalimentaire et cosmétique. Dans notre travail nous avons comparé entre les différentes sources de carbone glucose, mélasse et amidon et leurs effets sur la croissance de spiruline .ensuite nous avons étudié l'influence de déférentes intensités lumineuses et l'agitation sur la biomasse. On a obtenu la cinétique de croissance de la spiruline.

D'après les résultats obtenus, on peut sortir par des conclusions suivantes:

- La teneur en CO2 doit dans la gamme de 2,2 % à 5% dans l'aire injecte dans le PBR, pour obtenir les rendements et productivité maximale.
- Le glucose est le mieux adaptée pour la croissance en mixotrophie de spiruline, dans la gamme de 2.5 à 4.5 g/l et donne une Production de biomasse plus optimale.
- La mélasse donne une productivité proche à celle de glucose. Le meilleur rendement est obtenu à une concentration de 0.75g/l.
- la concentration finale plus élevée en biomasse est atteinte lorsque l'éclairage est optimal, entre 4Klux et 5 Klux.
- Une forte intensité lumineuse avec une forte agitation donne la croissance optimale.
- La teneur le plus élevée de chlorophylle de 14.2 mg/g de pois sec obtenue à faible éclairage de 3Klux.

Référence Bibliographique

A

Ahounou Morènikè Nadège 2018 La Spiruline : Un Complément Alimentaire En Conseil A L'officine. Enquête D'utilisation, These Pour Le Diplome D'etat De Docteur En Pharmacie

Anses. Avis De L'anses Relatif Aux "Risques Liés A La Consommation De Compléments Alimentaires Contenant De La Spiruline." Maisons-Alfort: 2017. Disponible Sur Https://Www.Anses.Fr/Fr/System/Files/Nut2014sa0096.Pdf (Dernière Consult

Aparicio P . J . Et. J. M. Maldonado , 1979. – Regulation Of Nitrate Assimilation In Photosynthése –Tic Organisms . In « Nitrogen Assimilation Of Plants »**,** Hewitt E. J. Etc. V. Cut-Ting Eds , Acad.Press ; London , 207-215**.**

Artu 2016, Etude Et Optimisation De La Culture De Microalgues En Photobioréacteurs Solaires, These De Doctorat En Génie Des Procédés, Universite Bretagne Loire

Aurélie L. Modélisation Et Conception D'un Système De Culture De Microalgues. Génie Des Procédés. Ecole Nationale Supérieure Des Mines De Paris, 2014. Français. Nnt : 2014enmp0048.

B

Babcock, R. W.; Malda, J. &Radway, J. C. Hydrodynamics And Mass Transfer In A Tubular Airlift Photobioreactor Journal Of Applied Phycology, Springer Netherlands, 2002, 14, 169-184.

Balloni,W.,Tomaselli,L ., Giovannetti ,L .Et Margheri ,M.C .(1980). Biologia Fondamentale Del Genere Spirulina . Materassi R . (Ed) Prospective Della Coltura Di Spirulina In Italia . P.49

Barsanti,L. Et Gualtieri ,P. (2006). Algae : Anatomy,Biochemistryand Biotecnology, Tylor Et Francis Group. 320 .

Batello, C ,. Marzot, M ., Touré , A, H, Et Fao, (2005) . Futur Est Ancien Lac . Savoirstraditionnel, Biodivercité Et Ressources Génétiques Pour L'agriculture Rt L'alimentation Dans Les Ecosystémes Du Bas Du Lac Tchad .Food And Agrucultire Organisation Of The U Nited Nations. 320p

Becker E. W.,1994. Microalgaebiotechnologyand Microbiology. Cambridge Pressuniversity.

Belay A,**1996**toshimitsu K, Yoshimichi.Spirulina (Arthrospira)..Potentialapplication As An Animal Feed Supplement. Ed. Dainipponink & Chemicals,Tokyo Japan .Journal Of Applied Phycology. P8,1 I.

Belay A., Ota Y , ; Miyakawa K ., Shimamatsu H.,Current Knowledge On Potentiel Health Benefits Of Spirulina J., Of Applied Phycology 5,235-241,1993

Belkoura1 M; ,Benider.A , Dauta2a ,Influence De La Température, De L'intensité Lumineuse Et Du Stade De Croissance Sur La Composition Biochimique De Chlorellasorokinianashihira&Krauss,*Annlslimnol.* 33 (1) 1997 : 3-11

Bensehaila.S. (2016). Etude De L'effet Antimicrobien Et Antidiabétique Des Probiotique En Association Avec De La Spiruline. Doctorat. Université De Hassiba Ben Bouali Chlef. P 72-125

Bernard C. Les Cyanobactéries Et Leurs Toxines. Rev Francoph Lab 2014;2014:53–68.

Bhaya D , Schwarz R , Grossman A (2000) Molecular Responses To Environmental Stress. The Ecology Of Cyanobacteria . Kluwer Academic Publisheres ,

Boudour.A. (2008). Recherche Et Essais De Purification De *Spirulina Sp* . Dans Différents Habitats Et Culture *D' Arthrospira Sp* . Pcc 8005.Diplôme De Magister.Université Badji Mokhtar-Annaba . P 123

Brennan, L. &Owende, P. Biofuels From Microalgae--A Review Of Technologies For Production, Processing, And Extractions Of Biofuels And Co-Productsrenewable And Sustainable Energy Reviews, **2010**, *14*, 557-577

Bumbak F., Cook S., Zachleder V., Hauser S., Kovar K., 2011. Best Practices In Heterotrophic High-Cell-Density Microalgal Processes: Achievements, Potential And Possible Limitations. Applied Microbiology And Biotechnology, 91(1), 31–46. Béchet

ت

Carmaux.S « Caractérisation De La Mort Des Cellules Animales Cultivées En Bioréacteur », *Henri Poincaré-Nancy Nancy Google Sch.*, 2008

Charpy.L., Langlade. M. J., Alliod.R. (2008). ''La Spiruline Peut-Elle Etre Un Atout Pour La Santé Et Le Développement En Afrique ?''. Institut De Recherche Pour Le Développement. Marseille. Rapport D'expertise Pour Le Ministère De L'agriculture Et De La Pêche.49 P.

Chen, H. And Jiang, J.G. (2009). Osmotic Responses Of Dunaliella To The Changes Of Salinity. J Cellphysiol 219: 251-258**.**

Chisti, Y. And Moo-Young, M. (2001). "Bioreactors Encyclopedia Of Physical Science And Technology" Meyers, R. A. New York, Usa, Academicpress. 247 -271

Chisti, Y. Biodiesel From Microalgae Biotechnology Advances, 2007, 25, 294-306.

Christenson, L. &Sims, R. Production And Harvesting Of Microalgae For Wastewater Treatment, Biofuels, And Bioproducts Biotechnology Advances, **2011**, 29, 686-702

Ciferri.O, (1983): Spirulina, The Edible Microorganism. *Microbiol. Rev.* 47(4), 5

Clément.G, 1975. Production Et Constituants Caractéristiques Des Algues Spirulina Platensis Et Maxima. *Ann Nutr Alim*. 29 : 477-488

Contreras, A.; García, F.; Molina, E. &Merchuk, J. C. Interaction Between Co2-Mass Transfer, Light Availability, And Hydrodynamic Stress In The Growth Of Phaeodactylum Tricornutum In A Concentric Tube Airlift Photobioreactor Biotechnology And Bioengineering, 1998a, 60, 317-325.

Cresswell C . F ., A. J . Tew Et O.A. M Lewis , 1979 . The Regulation Of Carbon Métabolism In C4 Photosynthetic Plants By Inorganic Nitrogen . In « Nitrogen Assimilation Of Plants » , Hiwitt E. J . Et C . V Cuttin Eds, Acad . Press, London , 451-473 .

Cruchot H , (2008) La Spiruline, Bilan Et Perspective. Thèse Docteur En Pharmacie.Université De France-Comite.

D

Danesi,E.D.G,Rangel,C.O ,Caravalho,J.C.M.,Sato.s . effect of reducing the light intensity on the growth and production of chlorophyll by spirulina platensis .biomass and bioenergy 26 (2004)329-335.

Danesi,E.D.G.Rangel,C.O.,Pelizer,K.H ,Caravalho,J.C.M.,Sato,Andmoraes,I.O

2001. Production Of Spirulinaplatensis Under Differenttemperatures And Ureafeedingregimes For Chlorophyllattainment In Proceedings Of The Eighth International Congress On Engineering And Food , Vol. 2 :1978-1982

Dineshkumar , Palanivel Jayasingam , Pitchai Sampathkumar.(2015).Enhance The Growth Of Spirulina Platensis Using Molasses As Organic Additives.

Doumenge. F. Durand-Chastel .H . Et Toulemont . A. (1993) . Spirilina . Algue Of Life . Bulletin De L'institut Océanographique De Monaco . Numéro Spécial 12 Monaco Musée Océanographique.222 P.

Dubey, R.C .2006 . A Textbook Of Biotechnologie .Fourthrevised And Enlargeedition ,S. Chand And Company Limited . 419-421

𝔈

Erell Olivo 2007 Conception Et Etude D'unphotobioreacteur Pour La Production En Continu De Microalgues En Ecloseries Aquacoles, Thèse De Doctorat En Génie Des Procédés

𝔉

Falquet,1996 Spirulina **:** Aspects Nutritionnels, Document Antenna Technologie Genéve

Falquet.J., Hurni.J.P. (2006). Spiruline, Aspects Nutritionnels, Antenna, Technology,Genève .

Fao Lavens, P. & Sorgeloos, P. (Eds.) Manual On The Production And Use Of Live Food For Aquaculture Fao Fisheries Technical Paper, 1996, 295

Farineau,J ., Morot-Gaudry, J-F .(2018) . La Photosynthese.Processus Physiques Moleculaires Et Physiologiques . France .Quae .P460

Ferhat W ,Lakehal S . 2019, Culture Et Production De La Spiruline Arthrospira Platensis Dans La Région D'el 'Oued.

Floc'h , J-Y. Leclerc , V .(2010). Les Secrets Des Algues . France . Quae . 168 P.

Fox R .D .1999. La Spiruline: Technique, Pratique Et Promesse. Aix-En-Provence.

𝔊

Gershwin ,**Meet Belay,A,(2007),**Spirulina In Human Nutrition And **Gutierrez –Salmean G . , Fabila-Castillo L Chamorro-Cevallos G** Nutrition Toxicological Aspects Of Spirulina (Arthrospira) Nutricion Hospitalaria 2015

Giuliana Becerra-Celis. Proposition De Stratégies De Commande Pour La Culture De Microalgue Dans Un Photobioréacteur Continu. Autre. Ecole Centrale Paris, 2009. Français. Nnt : 2009ecap0014

Goulamabasse T R (2018) : La Spiruline : Activités Thérapeutiques Et Son Intérêt Dans La Lutte Contre La Malnutrition A Madagascar. Université De Lille.

H

Habchi S .Hidja N.2013 Conception D'un Photobioréacteur Pour La Culture De Microalgues .Health.Crc Press Illustrée.(En Ligne).328p

Harrison P.J., Thompson Pa. &Calderwood G.S. 1990. Effects Of Nutrient And Light Limitation On The Biochemical Composition Of Phytoplankton. *J. Appliedphycol, 2* : 45-56.

Healy,F.P.Ethendzel , L.L. (1976) . Pjysiologicalchanges During The Course Of Blooms Of Aphanizomenonflos-Aquae.Journalof The Ficheriesresearcheboardof Canada ,(En Ligne) , 33,36 -4.

Hocini Med Abdelhadi2017 Production De La Spiruline En Algérie *(Arthrospira Platansis) :* Bilan Et Perspectives

Horrobin D.F., Omega-6 Essentiel Fatty Acides , Pathophysiology And Roles In Clinical Medicine , Wiley –Liss . New –York , 1990

I

Jackson. D.F 1962 ,Algae And Man: Based On Lectures Presented At The Nato Advanced Study . Louisville, Kentucky

James R , Sampath K Thangarathinam R , Vasudeven I (2006) Effect Of Dietary Spirulina Level On Growth , Fertility , Coloration And Leucocyte Count In Red Swordtail, Xiphophorus Helleri . Iseaeli Journal Of Aquaculture Bamidgeh 58 :97-104

Jaouen, P., Vandanjon, L. And Quemeneur, F. (1999). "The Shear Stress Of Microalgalcellsuspensions (*Tetraselmissuecica*) In Tangential Flow Filtration Systems: The Role Ofpumps." Bioresourcetechnology**68** (2). 149-154.

Jarisoia T., 2005. Adaptation De Spiruline Du Sud Demadagascar A La Culture En Eau De Mer, Mise Au Point De Structures De Production A L'échelle Villageoise.Thèse Doctora En Es Sciences En Océanologie Appliquée. Université De Toliara.

Jean-Paul Jourdan ., 2006 . Manuel De Culture Artisanale Pour La Production De Spiruline (Dernière Mise A Jour 1/3/2006)

Jeffrey Sw, Mantoura Rfc, Wright Sw(1997) Phytoplankton Pigments In Oceanography : Guidelines To Modern Methods , International Council Of Scientific Unions , Scientific Committee On Oceanic Reasearch , Unesco Publishing .

Jochen R. Golecki., 2004; Ultrastructure Of Cell Wall And Thylakoid Membranes Of The Thermophilic Cyanobacterium Synechococcus Lividus Under The Influence Of Temperature Shifts. Biology Archives Of Microbiology.

Johnson P . And Shubert , E.,Availability Of Iron To Rats Fromspirulina , A Blue – Green Algae , Nutrition Research , V .6 ,(1986),85-

Jones R , W .Et R . W. Shear, 1979-Light Factors In Nitrogen Assimilation . In « Nitrogen Assimilation Of Plants » , Hiwitt E. J . Et C . V Cuttin Eds, Acad Press, London , 521-539.

Jourdan J.P. 2007. Manuel De Culture De La Spiruline. Antenna Technologies. Disponible Sur :Http://Www.Antenna.Ch/Documents/Manueljourdan2o6l.Pdf

Jourdan J-P 1999 Cultivez Votre Spiruline , Manuel De Culture Artisanale De Spiruline , Antenna Technology P125

Jourdan. Manuel De Culture Artisanale De Spiruline. Edition 2006.

Jourdan. Jp (2018. Cultivé Votre Spiruline , Manuel De Culture Artisanale De Spiruline

Jourdan J. Manuel de culture artisanale de la spiruline. 2014. Disponible sur https://www.fichier-pdf.fr/2015/09/18/manuel-de-la-culture-artisanale-de-spiruline/manuel-de-la-culture-artisanale-de-spiruline.pdf (dernière consultation janvier 2018)

Julie Rimbert 2017,Spiruline : La Start-Up Toulousaine Qui Développe L'aliment De Demain

Junying,Z., Junfeng, R. Et Baoning,Z .2013 . Factorsin Mass Cultivation Of Microalgae For Biodiesel .Chin , J.Catal(En Ligne) , 34 ,80,-100 .

K

Karkos.Pd., Leong. S.C., Karkos.C.D., Sivaji. N. Assimakopoulos. D.A.,(2008). Spirulina In Clinical Practice: Evidence-Based Human Applications. Evid Based Complement Alternatmed 1-4

Khan, Z „ Bhadouria , P, Et Bisen ,P.S . (2005) . Nutritional And Therapeutic Potential Of Spirulina. Curr Pharm Biotechnol.6:373-379.

Kulshreshtha.A., Zacharia.A.J., Jarouliya.U., Bhadauriya .P., Prasad.Gb., Bisen.Ps. (2008). Spirulina In Health Care Management. *Curr Pharm Biotechnol*: 400-405

L

LAHOUCINE H A.,2019 . Etude De L'impact De Incorporation De La Spiruline Sur La Qualité Organoleptique Et Physicochimique De La Mayonnaise **.**

Lamela,T.Et Marquez ,F.J. (2000) . Phycocyanin Production In Seawater Culture Of D'arthrospira Maxima . Ciensas Marinas .Vol. 26(4) :607-619.

Larosière B.C .2012. Etude De La Croissance De Chlorella Vulgaris En Photobioréacteur Batch Et Continu, En Présence De Concentrations Elevées De Co2

Lecointre Robin 2017, Optimisation De La Production De Spiruline Dans Une Ferme A Madagascar Afin De Lutter Contre La Malnutrition Infantile. Association Esperanza Joie Des Enfants

Leema Jtm., Kirubagaran R., Vinithkumar Nv., Dheenan Ps., Karthikayulu S. High Value Pigment Production From Arthrospira (Spirulina) Platensis Cultured In Seawater. Bioresour Technol 2010;101:9221–7.

Lis Ramirez. Production De Bio-Carburants De 3ème Génération A Partir De Microalgues. Génie Chimique.Université Claude Bernard - Lyon I, 2013. Français. Nnt : 2013lyo10297.

Lupatini Al., Colla Lm., Canan C .,Colla E. Potentiel Application Of Microalga Spirulina Platensis As A Protein Source .J Sci Food Agric 2017 ; 97(3) :724-732

M

Manet A. La Spiruline: Indications Thérapeutiques, Risques Sanitaires Et Conseils A L'officine. Thèse D'exercice. Université Grenoble Alpes, 2016

Marie Debacq. Hydrodynamique En Génie Des Procédés : Fluidisation Et Agitation. Licence. Cgp109"Génie Des Procédés : Opérations Unitaires Fondamentales", Cnam Paris, France. 2019.

Marie-Esther Deroche (1983) Relations entre la photosynthèse et l'assimilation de l'azote, Bulletin de la Société Botanique de France. Actualités Botaniques, 130:1, 85-98 https://doi.org/10.1080/01811789.1983.10826592

Martinez –Galero E . , Pérez –Pastén R. , Perez-Juarez A.,Fabila-Castillo L.,Gutiérrez – Salmean G .,Chamorro G .Preclinical Antitoxic Properties Of Spiruline(Arthrospira) .Pharm Biol 2016 ;54 (8):1345-53.

Milner H.W. (1953). Rocking Tray.In: Burlew, J.S. (Ed.), Algal Culture : From Laboratory To Pilot Plant ,Publ.No.600,P.108 , Washington, Dc , The Camegie Institution

Mirón, A. S.; Gómez, A. C.; Camacho, F. G.; Grima, E. M. &Chisti, Y. Comparativeevaluation Of Compact Photobioreactors For Large-Scale Monoculture Of Microalgae Journal Of Biotechnology, **1999**, 70, 249-270

Muhling.M.(2000). Caractérisation Of Arthrospira (Spirulina)

N

N'goran Urbain Florent Niangoran. Optimisation De La Culture De La Spiruline En Milieu Contrôlé : Eclairage Et Estimation De La Biomasse. Optique / Photonique. Université Paul Sabatier – Toulouse Iii, 2017. Français. Nnt : 2017tou30378. Tel-02013829.

Niangoran , N.U.F. (2017) Optimisation De La Culture De La Spiruline En Milieu Controlé :Eclarage Et Estimation De La Biomasse . Université Paul Sabatier – Toulouse Iii.France . P 124.

O

Ogawa T, Fujii T, Aiba S (1981) Effect Of Oxygen On The Growth (Yield) Of Chlorella Vulgaris. Arch Microbiol 127: 25 – 31.

Ogbonda , **K,H.,Aminigo ,R ,E., Abu ,G. O. (2007).** Influence Of Temperature And Ph On Biomass Production And Proteinbiosynthesis In A Putative

Oswald W.J., 1988. Large Scale Algal Culture Systems (Engineering Aspects). In M.A. Borowitzka And L.J. Borowitzka Eds., *Micro-Algal Biotechnology*, Cambridge University Press, Cambridge, 357-394.

Ould Bellahcen.T., Bouchabchoub A.1., Massoui.M., El Yachioui .M .2013. Culture Et Production De Spirulina Platensis Dans Les Dans Les Eaux Usees Domestiques.14 :107-122.

P

Pandey,J.P .Neeraj Pathak , Amit Tiwari 2010standardization Of Ph And Light Intensity For The Biomass Production Of Spirulina Platensis J.Algal Biomass Utln 1 :93-102

Panigua-Michel J, Dujardin E, Sironval C. Histoire De Spiruline,Communication Botanique (En Ligne). C 2007.[Consulté Le : 24/01/2007]. Disponible Sur :Paredes-Carbajal Mc, Torres-Durán Pv, Díaz-Zagoya Jc, Mascher D And Juárezoropeza Ma. 1997. Effects Of Dietary Spirulina Maxima Onendothelium Dependentvasomotor Responses Of Rat Aortic Rings. *Life Sci* : 211-9.

Piorreck M., Baasch K.H. &Pohl P. 1984. Biomass Production, Total Protein, Chlorophylls, Lipids And Fattyacids Of Freshwater Green And Blue-Green Algae Under Different Nitrogen Regimes. *Phyrochemistry*, 23 (2) : 207-216.

Q

Quillet M., 1975 - Recherche Sur Les Substances Glucidiques Elaborées Par Les Spirulines. Ann. Nutr. Aliment. 29(6), Pages 553-561

R

Raven J.A., 1988. Limîts Of Growth. *In* Ma.Borowitzka And L.J. Borowitzkaeds., *Micro-Algal Biotechnology*, Cambridgeuniversity Press, Cambridge, 331-356.Richmond A.,

Reece, Jane B. 2011. Campbell Biology. Benjamin Cummings / Pearson**.** Spirulina Sp .Bioresourthecnol (En Ligne), 98,2207-2211.

Regunathan C, Wesley Sg(2006) Pigment Deficiency Correction In Shrimp Broodstock Using Spirulina As A Carotenoid Source . Aquaculture Nutition 1

Renaud S.M., Parry D.L., Thinh L.V., Kuoc ,Padovan A. & Sammy N. 1991. Effect Of Light Intensity On The Proximate Biochemicaland Fatty Acid Composition Of Isochrysissp. And Nanno Chloropsis Oculata For Use In Tropical Aquaculture. / . Applied Phycol,3 :43-53.

Reviers , B. **(2003)** .Biologie Et Phylogénie Des Algues . Paris . Belin . P.225

Richmond, A. Handbook of MicroalgalCulture: Biotechnology and Applied Phycology. Edition :9600 *Garsington Road, Oxford OX4 2DQ*, UK, 2004

S

Scheldeman P, Baurain D, Bouhy R, **Scott M, Belay A, Wilmotte A. Et Al.** Arthrospira (Spirulina) Strains From Four Continents Are Resolved Into Only Two Clusters, Based On Amplifed Ribosomal Dna Restriction Analysis Of The Internally Transcribed Spacer

Sguera,S,. Spirulina Platensis Et Ses Constituants : Intérêts Nutritionnels Et Activités Thérapeutiques.Sciences Pharmaceutiques. 2008. Hal-01732214

Sheehan J., T. Dunahay, J. Benemann And P. Roessler, « A Look Back At The U.S. Department Of Energy's Aquatic Species Program – Biodiesel From Algae ». Prepared For : U.S. Department Of Energy's Office Of Fuels Development, 1998.

Sialve B., Steyer J-P. Les Microalgues, Promesses Et Défis, Innovations Agronomiques 26 (2013), 25-39

Sili. **C .. Torzillo . G .&Vonshak . A .(2012)** . Arthrospira (Spirilina). Ecology Of Cyanobacteria Ii.[En Ligne]. 677-705 .

Sophie ,M.Développement D'un Bioprocédé Continu Couplant Laproduction Et La Purification D'un Anticorps Recombinant Sciences Agricoles. Université De Bordeaux, 2017. Français. Nnt : 2017bord0898.

Sorokin, C. And Krauss , R.W 1965. The Dependence Of The Cell Divition In Chlorella On Temperature And Light Intensity .Am.J .Bot.52 :331-339

Spoehr H.A., Milner H.W., 1949. The Chemical Composition Of Chlorellae: Effect Of Environmental Conditions. Plant Physiology, 24, 120–149.

T

Tabuttine I, Pierre –Yves G, Pierre M, (2002) – La Spiruline Contre La Malnutrition (Madruiéinede) , Antenna Technologie (Suisse) . Antenna Trust (Inde) , 24p .

Takache, H.; Christophe, G.; Cornet, J.-F. &Pruvost, J. Experimental And Theoretical Assessment Of Maximum Productivities For The Microalgae Chlamydomonas Reinhardtii In Two Different Geometries Of Photobioreactors Biotechnology Progress, 2009

TRABELSI L, (2009): Identification Et Caractérisation Des Polymères Extracellulaires De La Cyanobactérie Arthrospira Platensis Compère (1968).

Tredici, M. R., Mass Production Of Microalgae: Photobioreactors. In : Richmond, A.Handbookof Microalgal Culture - Biotechnology And Applied Phycologl Blackwell Publishing Ltd, 2004, 566.

Tsygankov, A. A. (2001)."Laboratory Scale Photobioreactors." Applied Biochemistry And Microbiology **37** (4). 333-341.

V

Vonshak, A., Abeliovich, A., Boussiba, S., Arad, S., Richmond, A. Production Of Spirulina Biomass: Effects Of Environmental Factors And Population Density. Biomass 2, 175– 185, 1982

Vonshak. A Vigad. Spirulina Platensis Arthrospira: Physiology, Cell-Biology And Biotechnology Edition Taylor Et Francis, P252, 2002.

Van Den Hende S., Vervaeren H., Boon N., 2012. Flue Gas Compounds And Microalgae: (Bio)Chemical Interactions Leading To Biotechnological Opportunities. Biotechnology Advances.

Vardaka, E., K. A. Kormas, M. Katsiapi, S. Genitsaris, Et M. Moustaka-Gouni.2016. "Molecular Diversity Of Bacteria In Commercially Available "Spirulina" Food Supplements." *Peerj* 2016 (1). Doi: 10.7717/Peerj.1610.

Vololonavalona B, Vicente N , Riva.A 2008 Colloque International Sur La Spiruline « La Spiruline Et Le Développement »P191

W

Watanuki H , Ota K , Tassakka Acmar , Kato T, Sakai M (2006) Immunostimulant Effects Of Dietary Spirulina Platensis On Carp , Cyprinus Carpio , Aquaculture 258 :157-163

Whitton,B , A Et Potts, M. (2000) .The Ecology Of Cyanobacterria **:** Theirdiversityin Time And Space.Illustrée. E Ligne . 669 P .

Winokur M.. 1948. Gowth Relationship Of *Chlorella* Species. *American J. Bot.*. 35.118-129.

𝒳

Xin,L., Hong –Ying , H Et Ying –Xue , S . (2010). Effects Of Differents Nitrogen And Phosphorus Concentration On The Growth ,Nutrient Uptake And Lipide Accumilation Of A Fresh Water Microalgae Scenedesmussp .Bioresour. T Echnol En Ligne , 101 (14) ,5494-5500 .

𝒴

Young- In Park (2012) Bioconversion Du Co2 En Biomasse Algale Et Utilisation De L'eau Usée Municipale Comme Source Additionnelle De Carbone Et D'oligoéléments P27.

Youping Xie , Yiwen Jin , Xianhai Zeng , Jianfeng Chen , Yinghua Lu , Keju Jing .Fed-batch strategy for enhancing cell growth and C-phycocyanin production of Arthrospira (Spirulina) platensis under phototrophic cultivation .Bioresource Technology 180 (2015) 281–287.

𝒵

Zarrouk C, (1966): Contribution A D'étude D'une Cyanophycée. Influence De Divers Facteurs Physiques Et Chimiques Sur La Connaissance Et La Photosynthèse De Spirulina Maxima. Thèse De Doctorat, Paris **.**

Annexe

Annexe I :

Position taxonomique de l'espèce Arthrospira platensis

Règne	Monera ou bactérie
Sous –règne	Procaryota
Phylum ou division	Cyanophyta ou cyanobacteria
Classe	Cyanophyceae
Ordre	Oscillatoriales
Famille	Oscillatoriaceae
Genre	Arthrospira
Espèce	Arthrospira platensis

Annexe II :

Valeurs moyennes des toxiques minéraux de la spiruline

Elements	**Moyenne**
Arsenic	0.06-2ppm
Sélénium *	0.01-0.04ppm
Cadmium	0.01-0.1ppm
Mercure	0.01-0.2ppm
Plomb	0.6-5.1ppm
Fluor*	112-630ppm

Annexe III :

Composition chimique d'un milieu minérale

Nom de l'intrant	**g /l**
Bicarbonate de sodium	**8**
Chlore de sodium	**5**
Nitrate de potassium	**2**
Sulfate de potassium	**1**
Phosphate monoammonique	**0.2**
Sulfate de magnésium	**0.2**
Urée	**0.02**
chaux	**0.02**
sulfate de fer	**0.005**

Composition chimique de milieu Zarrouk

Composition	**Concentration (g.L^{-1})**
NaHCO3	16.80
K2HPO4	0.50
NaNO3	2.50
K2SO4	1.00
Na Cl	1.00
Mg SO4. (7 H2O)	0.20
CaCl2	0.04
FeSO4. (7H2O)	0.01
EDTA	0.08

Composition chimique de solution d'oligoélémentA5

Oligo-éléments	**Concentration (g.*L*−1)**
H3BO3	2.86
MnCl2 .4 H2O	1.81
ZnSO3	0.22
CuSO4	0.08
MoO3	0.01

Composition chimique de solution d'oligoélément B6

Oligo-éléments	**Concentration (g.L -1)**
K2Cr (SO4)4 24 H2O	960 x 10-4
NiSO4.7H2O	478 x 10-4
Ti2(SO4)3	400 x 10-4
NH4VO3	229 x 10-4
Na2WO4	179 x 10-4
Co(NO3)2.6H2O	44 x 10-4

Annexe IV :

Effect of différent light intensity on biomass production of Spirulina platensis

S.No	Intensité lumineuse	Poids sec in g/500ml (Mean±sem)	Chl a content in mg/g (Mean±Sem)	Protein content in % of dry wt (Mean±Sem)
1	3klux	0.60±0.020	14.2±0.076	59.2±0.065
2	3.5klux	0.68±0.035	13.3±0.045	61.2±0.086
3	4klux	0.73±0.076	11.4±0.038	63.4±0.076
4	4.5klux	0.75±0.089	11.6±0.075	60.5±0.039
5	5klux	0.85±0.030	9.8±0.074	64.3±0.035