



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère De l'Enseignement Supérieur Et De la Recherche Scientifique



Université Abbès Laghrou -Khenchela

Faculté des Sciences de la Nature Et de la Vie

Département de Biologie Moléculaire et Cellulaire

Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de Master

Option : **Microbiologie appliquée**

Thème :

Les cyanobactéries thermophiles : diversités et potentialités

Présenté par :

IKEN Nedjela

AYEB Mahbouba

Membres du jury :

Président : **M^{me} YAKHLEF W.** MCB Univ. Abbès Laghrou Khenchela

Encadreur : **M^{elle} BOUTERFA S.** MAA Univ. Abbès Laghrou Khenchela

Examineur : **M^{me} ARAB Y.** MAA Univ. Abbès Laghrou Khenchela

2020-2021

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

À MES CHERS PARENTS

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consentis pour mon instruction et mon bien être.

Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, et de vos innombrables sacrifices, bien que je ne vous en acquitterai jamais assez.

Puisse Dieu, le Très Haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie et faire en sorte que jamais je ne vous déçoive.

À MA CHERE SŒUR : Lamia

En témoignage de mon affection fraternelle, de ma profonde tendresse et reconnaissance, je te souhaite une vie pleine de bonheur et de succès.

À MES CHERES FRERES : Mounir et Aymen

Que Dieu, le tout puissant, vous protège et vous garde

À MA CHERE ENSEIGNANTE ET SŒUR : Wahiba

Mes chers neveux : Ahmed Abd Salam, Moudjib El Rahman, Mouaadh

Mes petits anges : Zyad, Iyad, Alaa El Rahman

A mon binôme **Mahbouba** qui j'ai vécu des beaux moments au cours de ces années, ainsi qu'à sa famille.

À toute ma famille

A tous ceux qui me sont chères

A tous ceux qui m'aiment

A toute ma promotion

NEDJEL

Dédicaces

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail.

A mes chers parents pour leur amour, leur soutien, leur patience, leur encouragement, Que Dieu les garde et les protège.

A mes chères sœurs et mon frère, source de joie et bonheur.

A mes grands-parents paternels et maternels, que Dieu garde leurs âmes dans son vaste paradis.

A toute ma famille.

A Nedjela ma chère amie avant d'être binôme.

Au nom de l'amitié qui nous réunit.

A mes enseignants.

A ma meilleur Dr Y.W pour son aide et sa gentillesse

Je dédie ce travail à tous ceux qui ont participé à ma réussite.

Mahbouba

REMERCIEMENTS

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Nous tenons à remercier Mme **YAKHLEF Wahiba**, Maitre de conférences B, Université Abbès Laghrour Khenchela, d'avoir accepté de présider notre travail ainsi que pour son soutien.

Nous remercions sincèrement Mme **ARAB Yasmin**, Maitre-assistante A à l'université Abbès Laghrour Khenchela, d'avoir accepté d'examiner ce modeste travail.

Nous tenons également à exprimer, nos remerciements, nos reconnaissances et notre respect à notre encadreur M^{elle} **BOUTERFA Soumia**, Maitre-assistante A à l'université Abbès Laghrour Khenchela, pour ses orientations, sa patience et ses précieux conseils.

Un très grand merci à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à l'élaboration de ce travail.

Les cyanobactéries thermophiles : diversités et potentialités

Résumé :

Les cyanobactéries ou cyanophycées ou encore algues bleues appartiennent à un groupe de procaryotes photosynthétiques à Gram négatif. Présentant des caractéristiques écologiques très variées qui permettent de coloniser la plupart des habitats aquatiques ou terrestres.

Un grand nombre d'entre elles sont adaptées à des environnements extrêmes comme les sources chaudes (cyanobactéries thermophiles) grâce à des capacités qui leur permettent de supporter des températures élevées.

Les Cyanobactéries sont connues pour produire une large gamme de métabolites secondaires ayant des propriétés d'importance biotechnologique, biomédicale et industrielle. Certaines espèces produisent également des toxines appelées cyanotoxines.

Mots-clés : cyanobactéries, thermophiles, applications, biotechnologie.

Thermophilic *Cyanobacteria*: diversity and potentials

Abstract:

Cyanobacteria or *Cyanophyceae* or blue algae belong to a group of photosynthetic Gram-negative prokaryotes. With very varied ecological characteristics that allow colonization of most aquatic or terrestrial ecosystems.

Many of them are adapted to extreme environments such as hot springs (thermophilic *Cyanobacteria*) due to their capacities that allow them to withstand high temperatures.

Cyanobacteria are known to produce a wide range of secondary metabolites with properties of biotechnological, biomedical and industrial importance. Some species also produce toxins called cyanotoxins.

Keywords: *Cyanobacteria*, thermophiles, applications, biotechnology.

السيانوبكتيريا المحبة للحرارة: التنوع والتطبيقات

ملخص:

تنتهي السيانوبكتيريا أو الطحالب الزرقاء إلى مجموعة من بدائيات النوى ذات التركيب الضوئي سالبة الجرام تحتوي على خصائص بيئية متنوعة للغاية تسمح باستعمار معظم المواطن المائية أو البرية. يتكيف العديد منهم مع البيئات القاسية مثل الينابيع الساخنة (السيانوبكتيريا المحبة للحرارة) بفضل القدرات التي تسمح لهم بتحمل درجات الحرارة المرتفعة.

من المعروف أن السيانوبكتيريا تنتج مجموعة واسعة من المستقلبات الثانوية مع خصائص التكنولوجيا الحيوية والطب الحيوي والأهمية الصناعية. تنتج أيضًا بعض الأنواع من السموم تسمى السموم الزرقاء.

الكلمات المفتاحية: السيانوبكتيريا، المحبة للحرارة، التطبيقات، التكنولوجيا الحيوية.

TABLE DES MATIERES

Résumés

Liste des tableaux	I
Liste des figures	II
Liste des abréviations	III

Introduction	1
---------------------------	----------

Revue bibliographique

CHAPITRE I : Généralités sur les cyanobactéries

1. Définition.....	3
2. Principales caractéristiques des cyanobactéries.....	4
3. Composition des cyanobactéries.....	5
3.1. Organisation cellulaire des cyanobactéries.....	5
3.2. Organisation morphologique	5
3.2. 1. Les cellules végétatives	6
3.3. 2. Les hétérocystes	6
3.4. 3. Les akinètes	7
4. Classification des cyanobactéries	7
5. Ecologie et habitat des cyanobactéries.....	8
5.1. Symbiose	9
5.2. Pigment photosynthétiques.	10
5.2.1. Phycobiliprotéines	10
5.2.2. Caroténoïdes	10
5.2.3. Chlorophylle	10
5.3. Mode nutritionnel des cyanobactéries	11
5.3.1. Photo-lithotrophie stricte	11
5.3.2. Photo-hétérotrophie	11

5.3.3. Chimio-hétérotrophie Facultative.....	11
5.4. Métabolisme	11
6. Reproduction	11

CHAPITRE II : La potentialité des cyanobactéries thermophiles

1. Microorganismes thermophiles.....	12
1.1. Classification des microorganismes thermophiles.....	12
1.2. Cyanobactéries thermophiles.....	12
1.3. Ecologie des cyanobactéries thermophiles.....	13
1.4. Thermalisme en Algérie	14
2. Applications des cyanobactéries thermophiles	15
2.1. Produits pharmaceutiques	16
2.1.1. Composés antimicrobiens.....	17
2.1.2. Composés antiviraux.....	17
2.1.3. Composés anti-protazoaires.....	17
2.1.4. Composés anti-cancéreux.....	18
2.2. Cyanotoxines.....	18
2.2.1. Hépatotoxines.....	19
2.2.2. Dermatotoxines.....	19
2.2.3. Neurotoxines.....	19
2.3. Bioplastiques.....	19
2.4. Teintures et colorants.....	20
2.5. Composés photoprotecteurs	21
2.6. Biofertilisants.....	21
2.7. Compléments alimentaires	22
2.8. Potentialités agricoles.....	22
2.9. Biocarburants.....	23
2.10. Dépollution	23
Conclusion	24
Références bibliographiques	25

Liste des tableaux

Tableau 01 :	Taxonomie des cyanobactéries et spécificités observées	8
Tableau 02 :	Composés bioactifs importants isolés de cyanobactéries	18
Tableau 03 :	Espèces de cyanobactéries productrices de toxines communes et leur activité biologique	19

Liste des figures

Figure 01 :	Structure cellulaire des cyanobactéries.....	3
Figure 02 :	Organisation générale d'une cyanobactérie.....	5
Figure 03 :	Les différentes morphologies des cyanobactéries.....	6
Figure 04 :	Les cellules végétatives des cyanobactéries	7
Figure 05 :	Division des organismes vivant selon leur température de croissance.....	13
Figure 06 :	Répartition mondiale des zones géothermiques où les microorganismes thermophiles ont été isolés.....	14
Figure 07 :	Répartition des sources thermales dans le Nord algériens.....	15
Figure 08 :	Représentation schématique montrant l'application des cyanobactéries en biotechnologie.....	16

Liste des abréviations

AAM	Acides aminés de type mycosporine.
AGPI	Acides gras polyinsaturés.
ARNr	Acide ribonucléique ribosomique.
CO₂	Dioxyde de carbone.
H₂O	L'eau.
H₂S	Sulfure d'hydrogène.
ICBN	Code International de Nomenclature des Bactéries.
ICNB	Code International de Nomenclature Botanique.
MDR	Souches bactériennes multi résistantes.
N₂	Diazote.
nm	Nanomètre.
PHA	Polyhydroxyalcanoates.
PHB	Polyhydroxybutyrate.
Topt	Température optimale.
µm	Micro- mètre.
UV	Ultraviolet.
VIH	Virus de l'immunodéficience humaine.
°C	Degré Celsius.
%	pourcentage.

INTRODUCTION

Les cyanobactéries sont des microorganismes procaryotes, anciennement appelés Algues bleues ou cyanophycées. Elles appartiennent au domaine des *Bacteria* ce microorganisme obtiennent leur énergie à partir de la photosynthèse Les cyanobactéries représentent un groupe très hétérogène qui a permis de coloniser la grande majorité d'écosystèmes terrestres et aquatiques (**Garrity et al., 2001 ; Lando, 2011 ; Eben Moussi, 2014**).

A la fin des années soixante, le microbiologiste américain Thomas Brock a montré que des populations microbiennes abondantes proliférant dans les sources chaudes du Parc National de Yellowstone aux Etats-Unis, à des températures comprises entre 50 °C et 90 °C. Cette découverte allait ouvrir la voie à une nouvelle ère passionnante de la microbiologie. Désormais tous les milieux extrêmes de la planète allaient être l'objet de nombreuses investigations destinées tant à répertorier les microorganismes capables d'y proliférer, qu'à repousser les limites de la vie sur terre (**Guezennec, 2004**). Depuis ce temps, divers microorganismes extrêmement thermophiles ont été isolés. La majorité de ces organismes appartiennent aux archées (**Brock et Freeze, 1969**).

La température est l'un des paramètres de l'environnement les plus importants, si ce n'est pas le plus important, vis-à-vis de l'impact sur la croissance et la survie des microorganismes. Si la température est trop basse ou trop élevée, les micro-organismes ne se développeront pas. Néanmoins, selon les micro-organismes et leur habitat d'origine, ces températures minimales et maximales varient énormément. La vie microbienne est très abondante dans des environnements où la température est élevée, y compris dans l'eau bouillante. Au-delà de 65 °C environ, où seule la vie procaryote existe, il existe une grande diversité de *Bacteria* et d'*Archaea* (**Madigan et Martinko, 2007**).

Au cours des dernières années, des études microbiologiques fondées sur des approches moléculaires et culturales ont révélé une grande diversité phylogénétique et physiologique des microorganismes colonisant les sources hydrothermales terrestres. En outre de la capacité de ces microorganismes à tolérer et à résister aux températures et aux conditions extrêmes. Ce groupe de microorganismes dits thermophiles constitue une source d'enzymes thermostables potentiellement utiles pour des applications biotechnologiques et industriels (**Leuschner et Antranikian, 1994**).

Notre étude consiste à étudier la diversité des cyanobactéries thermophiles et à montrer l'importance de leur application dans divers domaines, notamment celui de la biotechnologie. A cet égard ce mémoire est divisé en deux grands volets ou chapitres :

- Le premier volet aborde des généralités sur les cyanobactéries, à savoir leur morphologie, leur classification et leurs métabolisme ;
- Le deuxième volet vise les applications biotechnologiques des cyanobactéries thermophiles ;

CHAPITRE I :
Généralités sur les
cyanobactéries

1. Définition

Les cyanobactéries, un groupe de procaryotes photo-autotrophes à Gram négatif, qui sont capables de réaliser la photosynthèse oxygénée. Elles sont également connues sous le nom d'algues bleues et aussi cyanophycées qui représentent les caractéristiques des algues et des bactéries (**Singh *et al.*, 2011**).

Les cyanobactéries sont divisées en 5 groupes morphologiques par le BERGEY's manuel. Leur photosynthèse est identique à celle des végétaux par ses produits et sa source de protons (photolyse de l'eau). Elles ont une diversité morphologique considérable et une taille bien plus importante que celle des autres bactéries : 20 à 200 μm pour les cyanobactéries du sol, alors que les espèces marines sont beaucoup plus petites (fig. 01) (**Boussebouaa, 2002**).

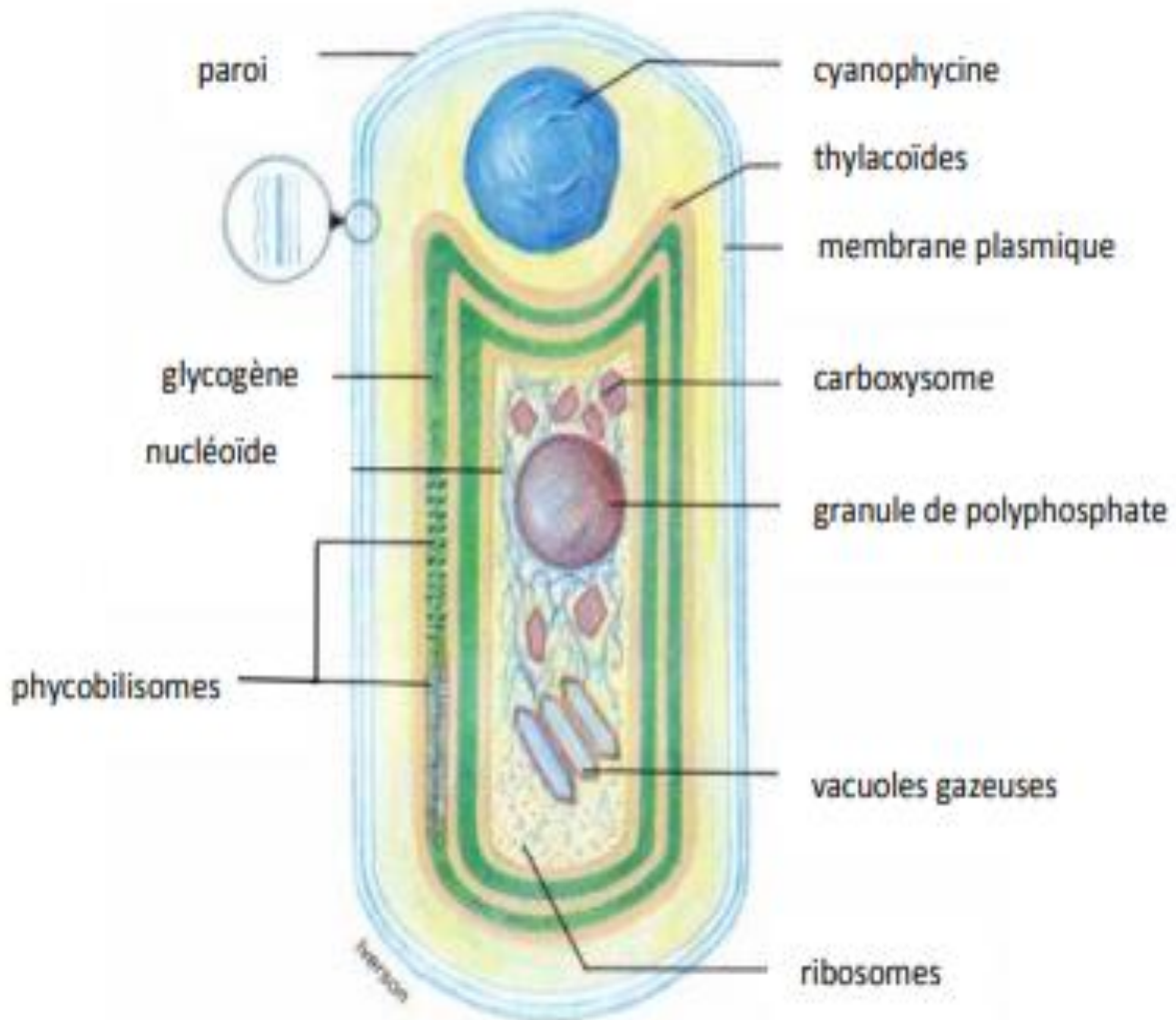


Figure 01 : Structure cellulaire des cyanobactéries (**Prescott *et al.*, 1995**).

2. Principales caractéristiques des cyanobactéries

- Les cyanobactéries possèdent la chlorophylle a et des pigments photosynthétiques accessoires : les phycobilines. La nature des cyanobactéries a été connue à partir de leurs enveloppes contenant des peptidoglycanes et de l'utilisation des phycobilisomes comme des complexes collectent sur de la lumière (**Boussebouaa, 2002**).
- Les cyanobactéries ont également développé différentes stratégies de protection contre les rayons ultraviolets (UV) et le rayonnement excessif. Par exemple, elles synthétisent des composés qui agissent comme un écran solaire (mycosporine-likeaminoacids) et d'autres pigments qui sont photo-protecteurs (caroténoïdes) car ils éliminent les molécules oxydantes résultant du rayonnement excessif (**Lavoie et al., 2007**).
- Les cyanobactéries sont caractérisées par l'absence de compartimentation cellulaire (c'est-à-dire l'absence de noyaux, de chloroplaste et de mitochondries) (**Bernard et al., 2017**).
- Certaines cyanobactéries synthétisent des toxines appelées cyanotoxines qui sont libérées dans l'eau lors de la lyse de la cellule et qui peuvent être dangereuses pour l'homme et l'animal. (**Bertrand, 2004**).
- L'analyse phylogénétique des cyanobactéries basée sur les gènes de l'Acide ribonucléique ribosomique 16S (ARNr 16S) a montré qu'il s'agissait d'un phylum monophylétique diversifié d'organismes dans le rayonnement bactérien (**Abed et al., 2008**).
- Selon la taxonomie classique, les cyanobactéries forment un taxon monophylétique qui peut être divisé en 5 groupes (ordres) comprenant environ 150 genres et approximativement 2000 espèces (**Lévesque et al., 2017**).
- Dans la plupart des cyanobactéries, le transport d'électrons photosynthétiques se produit uniquement dans les thylacoïdes, tandis que le flux d'électrons respiratoire a lieu à la fois dans les systèmes membranaires thylacoïdes et cytoplasmiques (**Wim Vermaas, 2001**).
- Les cyanobactéries vivent à l'état isolé ou demeurent associées en filaments. Leurs parois sont parfois épaissies par une capsule polysaccharidique ; ou elles sont minces et les cellules peuvent se déplacer par glissement comme les Myxobactéries. (**Davat, 1996**).

3. Composition des cyanobactéries

3. 1. Organisation cellulaire des cyanobactéries

La cellule végétative de la cyanobactérie est limitée par une membrane cytoplasmique, doublée vers l'extérieur d'une paroi, elle-même entourée d'une matrice plus ou moins mucilagineuse (**Gaveriaux, 2018**).

Les cyanobactéries sont caractérisées par l'absence de membranes nucléaire, de mitochondries et de réticulum endoplasmique. Les molécules d'Acide désoxyribonucléique (ADN) ne sont pas enfermées dans une enveloppe nucléaire, elles sont libre dans le cytoplasme (partie centrale du cytoplasme) ; l'information génétique est portée par un grand chromosome accompagné de quelques petits chromosomes circulaires, les plasmides. Cette information est transmise aux ribosomes qui élaborent les protéines spécifiques en respectant les ordres de montage imposée par l'ADN (Fig.02) (**Cécile, 2014 ; Gaveriaux, 2018**).

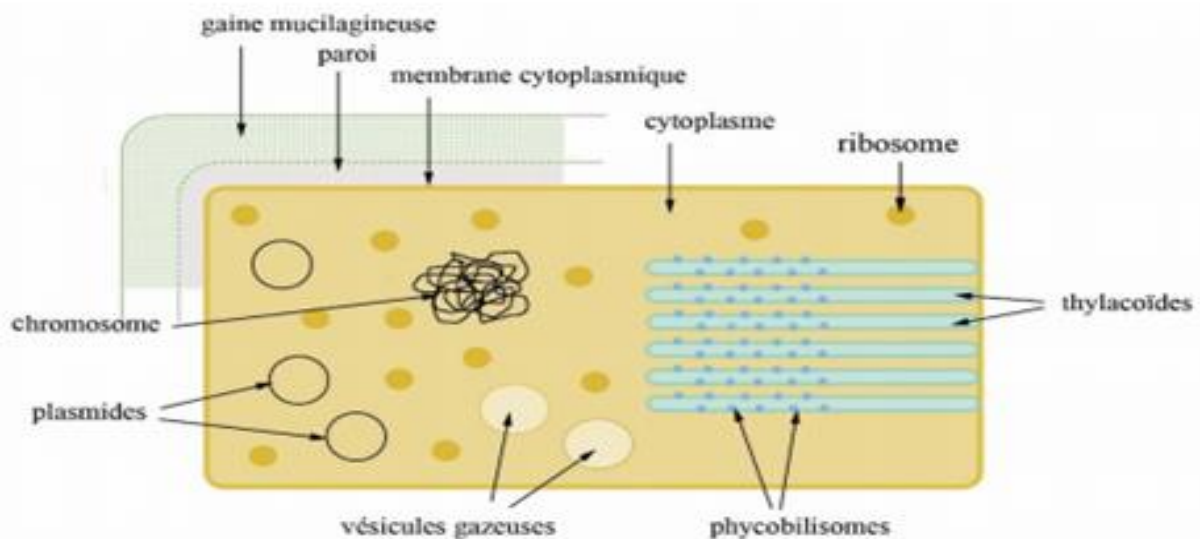


Figure02 : Organisation générale d'une cyanobactérie (**Gaveriaux, 2018**).

3.2. Organisation morphologique

Les cyanobactéries ont des formes variées ; elles sont soit unicellulaires de forme sphérique ou bâtonnet, soit pluricellulaires formant alors des colonies filamenteuses ou trichomes (fig. 03). Leur dimension varie de 1 à 10 μm . On distingue trois type de cellule (**Delarras, 2010**).

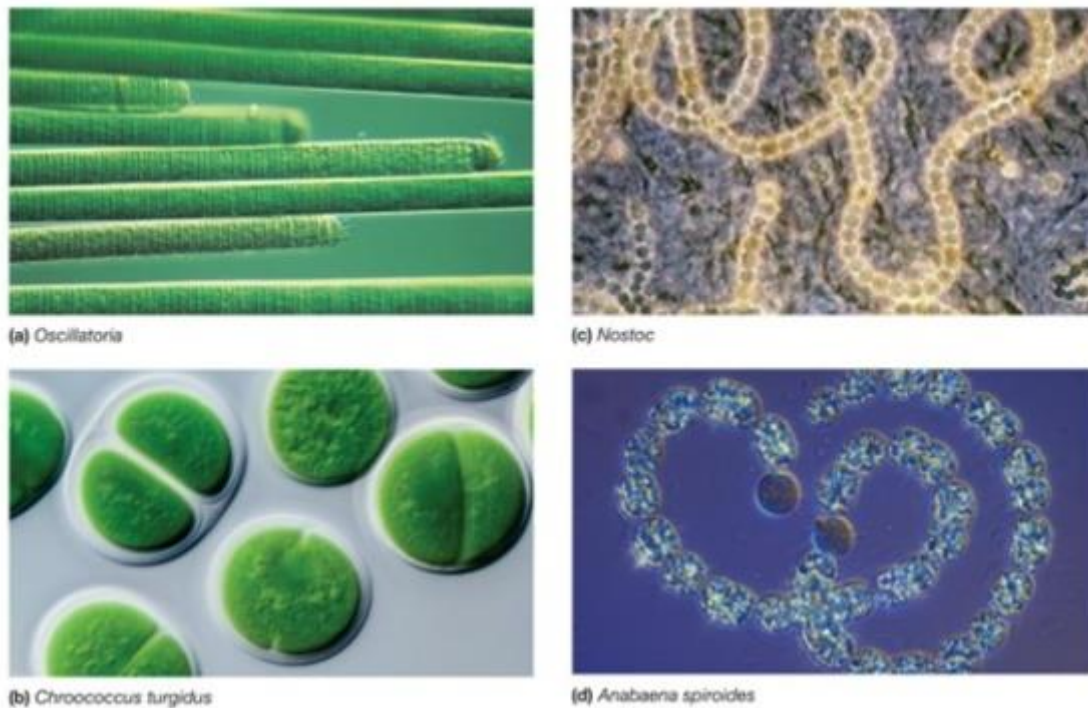


Figure 03 : Les différentes morphologies des cyanobactéries (Delarras, 2010).

[(a) Trichomes d'*Oscillatoria* vus au microscope à contraste interférentiel de Nomarski ($\times 250$). (b) *Chroococcus turgidus* produit une gaine gélatineuse qui peut entourer une, deux ou quatre cellules chacune. (c) *Nostoc sp.* Produit des hétérocystes en l'absence d'azote combiné ; ici elle n'a que des cellules végétatives. (d) La cyanobactérie *Anabaena spiroides* avec des hétérocystes ($\times 1000$)].

3.2.1. Les cellules végétatives

De forme variées rondes, ovoïdes, oblongues, quadratiques et avec un contenu cellulaire homogène ou non, avec ou sans vacuoles à gaz. Les cellules végétatives, cellules photosynthétiques, sont formées dans des conditions de croissances favorables. Cellule mère dont les fonctions métaboliques sont actives ou se fait la formation d'une endospore ; le phénomène de sporulation (Gupta et Griffiths, 2002 ; Tortora *et al.*, 2003 ; Komareket *al.*, 2003).

3.2.2. Les hétérocystes

Les hétérocystes ont un certain nombre de traits caractéristiques facilement visibles par microscopie optique. Ils sont généralement plus gros que les cellules végétatives, avec un cytoplasme moins granulaire, des parois cellulaires épaissies et des corps polaires rétractiles au point de contact avec les cellules adjacentes (David et Paula, 1999).

3.2.3. Les akinètes

Les akinètes sont des cellules caractérisées par une grande taille par rapport aux cellules végétatives, leur paroi cellulaire épaisse et leurs couches tégumentaires supplémentaires, et leur teneur élevée en réserves d'azote sous forme de granules de cyanophycine (fig. 04). Ces dernières germent pour former de nouveaux filaments (**Pichel, 2009**).

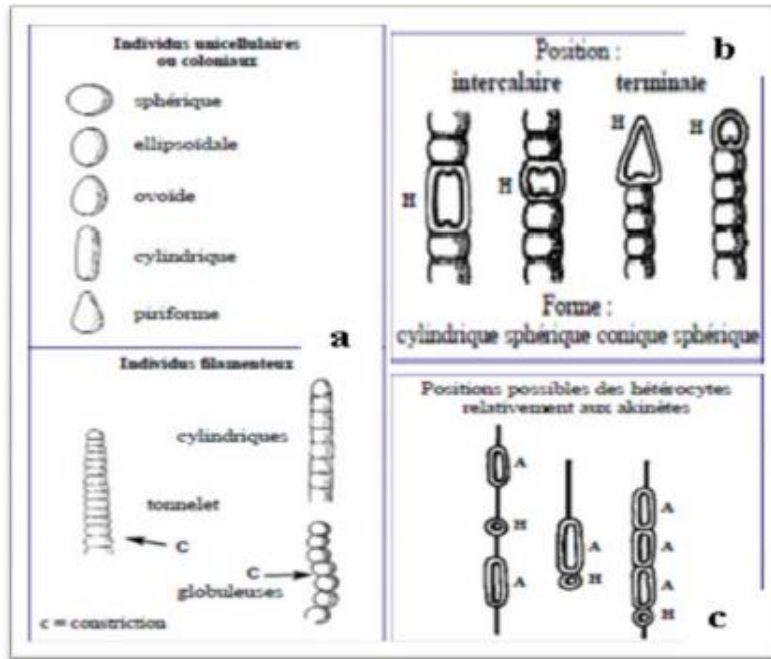


Figure 04 : Les cellules végétatives des cyanobactéries (**Komàreket al., 2003**).

[(a) Les cellules végétatives ; (b) Les hétérocystes ; (c) les akinètes].

3.3. Classification des cyanobactéries

Il y a une correspondance entre la classification de ces microorganismes dans le code international de nomenclature botanique (ICBN) et celle du code international de nomenclature des bactéries (ICNB). L'approche botanique s'appuie sur des critères morphologiques (dimension cellulaire, forme des colonies) et physiologiques tels que la composition en pigments, la présence de vésicules à gaz, la composition en substances de réserve, la paroi cellulaire ou encore la présence des cellules différenciées (hétérocystes ou akinètes) et le mode de multiplication. L'approche bactériologique est basée sur les caractères physiologiques et génotypiques de culture pure (Tab.01) (**El herry, 2008**).

Tableau 01 : Taxonomie des cyanobactéries et spécificités observées (Sotton, 2012).

I.C.N.B	I.C.B.N	Spécificités décrites
Section I	<i>Chroococcales</i>	Formes unicellulaires ou agrégats non filamenteux maintenus par les parois externes ou une matrice gélatineuse. Reproduction par division binaire suivant 1, 2 ou 3 plans symétriques ou non, ou par bourgeonnement. Akinètes rares.
Section II	<i>Pleurocapsales</i>	Formes unicellulaires ou agrégats non filamenteux maintenus par les parois externes ou une matrice gélatineuse. Reproduction par fissions multiples internes avec production de cellules filles plus petites que les cellules parentales ou par un ensemble de fissions multiples et binaires. Akinètes rares.
Section III	<i>Oscillatoriales</i>	Reproduction par division binaire dans un seul plan produisant des trichomes unisériés sans ramifications vraies. Trichomes composés de cellules ne se différenciant pas en hétérocystes. Akinètes non enregistrées à ce jour.
Section IV	<i>Nostocales</i>	Reproduction par division binaire dans un seul plan produisant des trichomes unisériés sans ramifications vraies. Une ou plusieurs cellules du trichome se différencient en hétérocystes, au moins lorsque le milieu est carencé en azote. Formation des akinètes possible.
Section V	<i>Stigonematales</i>	Reproduction par division binaire, parfois ou fréquemment suivant plusieurs plans, donnant trichomes présentant différents types de ramifications vraies. Formation des hétérocystes et des akinètes possible.

4. Ecologie et habitat des cyanobactéries

L'hétérogénéité des cyanobactéries leur a permis de coloniser la plupart des écosystèmes terrestres ou aquatiques tel que les eaux douces superficielles (Lacs, rivières ...),

les eaux marines, les eaux thermales chaudes ou glacées. Dans les eaux courantes comme stagnantes, leur mode de vie peut être planctonique ou benthique. Par ailleurs, elles peuvent être libres ou symbiotiques (**Delarras, 2014**).

Les cyanobactéries (cyanophytes) comprennent un grand nombre d'espèces connues ; leur habitat est très varié. On les rencontre dans les eaux douces ou marines. Certaines espèces peuvent supporter des conditions extrêmes et par exemple se développer à la surface des calcaires marins engendrés par l'activité des cyanobactéries (**Farineauet al., 2017**).

Certaines espèces vivent dans l'eau salée, saumâtre ou fraîche, dans les sources froides et chaudes, et dans des environnements où aucune autre micro algue ne peut exister. La plupart des formes marines poussent le long du rivage sous forme de végétation benthique. Les cyanobactéries constituent une grande partie du plancton marin avec une distribution mondiale.

Localités d'eau douce avec divers trophiques sont les principaux habitats des cyanobactéries. De nombreux espèces caractéristiquement habitent, et peuvent parfois dominer, à la fois épi limniques proches de la surface et profonds, euphotiques, eaux hypo limniques des lacs. D'autres colonisent les surfaces en se fixant à des roches ou des sédiments, forment parfois des nattes qui peuvent se déchirer et flotter à la surface. Les cyanobactéries ont une capacité impressionnante à coloniser des substrats stériles tels que les cendres volcaniques, le sable du désert et les roches. Ce sont des excavateurs extraordinaires, creusent des creux dans le calcaire et des types spéciaux de degrés. Aussi leur capacité à survivre à des températures extrêmement élevées. Les cyanobactéries est des habitats des sources chaudes, des ruisseaux de montagne, des lacs arctiques et antarctiques (**Bartram, 1999**).

4.1. Symbiose

Les cyanobactéries forment une grande variété d'associations symbiotiques avec des hôtes eucaryotes, notamment des plantes, des champignons, des éponges et des protistes. Les bryophytes, les ptéridophytes, les gymnospermes et les angiospermes (**Bartram, 1999**).

Les symbiotes cyanobactériens (cyanobiontes) fournissent généralement à leurs hôtes de l'azote fixé, bien qu'ils puissent également fournir du carbone fixé aux hôtes non photosynthétiques. Les principaux hôtes végétaux sont les bryophytes, les cycadales, l'angiosperme *Gunnera*, la fougère *Azolla* et les champignons (pour former des lichens) (**Adams et Duggan, 2008**).

4.2. Pigments photosynthétiques

Les cyanobactéries présentent une pigmentation diversifiée (outre des caroténoïdes également observés chez les micro-algues, elles présentent des phycobiliprotéines comme la phycocyanine, l'allophycocyanine et la phycoérythrine) qui assurent une efficacité photosynthétique élevée et une capacité à soutenir la production photosynthétique même à une faible intensité lumineuse. Ceci permet notamment à certaines espèces comme *Planktothrix rubescens* d'utiliser les faibles quantités de lumière et les longueurs d'onde encore présentes en profondeur dans les lacs. D'autres espèces sont capables d'exploiter les faibles niveaux d'énergie lumineuse des eaux très turbides (par exemple des pico cyanobactéries) (**Oberhaus et al., 2007 ; Katano et al., 2008**).

Les cyanobactéries sont aussi capables de synthétiser des composés qui agissent comme un écran solaire contre les ultraviolets (mycosporine-likeaminoacids) et d'autres pigments photoprotecteurs caroténoïdes leur permettant d'occuper des écosystèmes où l'exposition aux ultraviolets est très forte. De même, certains genres comme *Nostoc* possèdent également des mécanismes efficaces de réparation des composantes cellulaires endommagées par les fortes radiations solaires (par exemple l'ADN) (**Whitton et Malcolm, 1984 ; Vincent et Quesada, 1993 ; Sinha et al., 2001**).

4.2.1. Phycobiliprotéines

Les phycobiliprotéines sont des pigments photosynthétiques formés de phycobilines liées à un polypeptide par une liaison thioester (**Forét, 2018**).

4.2.2. Caroténoïdes

Les caroténoïdes forment une famille de pigments orange et jaunes présents dans la plupart des organismes photosynthétiques présents en grande quantité dans les racines de carotte ou dans les fruits de la tomate. Ils sont également très répons dans les feuilles vertes (**Hophins, 2003**).

4.2.3. Chlorophylle

La chlorophylle est une molécule verte complexe contenant un noyau tétra pyrrolique fermé. Encore appelé porphyrine, issu de la voie lévulinique, Support de la photosynthèse. C'est un pigment accessoire qui absorbe 650nm in situ, elle est un constituant important de l'antenne périphérique du photosystème, la LHC (Light Harvesting Complexii) (**Roque et Gudin ,1998 ; Farineau et Morot-Gaudry, 2005**).

4.3. Mode Nutritionnel

Le mode nutritionnel des cyanobactéries peut être de trois types (**Reviere, 2003**).

4.3.1. Photo-lithotrophie stricte

Ces cyanobactéries ne peuvent croître qu'en présence de lumière, leur donneur d'électrons est minéral « l'eau et sulfure d'hydrogène » (H_2O ou H_2S) et leur source de carbone est inorganique « dioxyde de carbone » (CO_2). (**Carrabin, 2011**).

4.3.2. Photo-hétérotrophie

Ces cyanobactéries utilisent en présence de lumière, la source d'électrons est minérale (H_2O ou H_2S), mais ce groupe de cyanobactéries est capable d'utiliser une source de carbone inorganique ou organique (**Carrabin, 2011**).

4.3.3. Chimio-hétérotrophie facultative

Sont des cyanobactéries phototrophes en présence de lumière, mais leur croissance peut également se dérouler dans l'obscurité en utilisant une source de carbone organique (limitée au glucose, au fructose et à quelques disaccharides) (**Carrabin, 2011**).

4.4. Métabolisme

La majorité des cyanobactéries sont aérobies photo-autotrophes. Elles n'ont besoin que d'eau, de dioxyde de carbone, de substances inorganiques et de lumière. La photosynthèse est leur principal mode de métabolisme énergétique (**Dumont, 2006**).

Les cyanobactéries peuvent se développer de manière photo-autotrophique en utilisant de préférence l'ammonium, le nitrate ou l'urée comme source d'azote, mais beaucoup de cyanobactéries peuvent fixer diazote (N_2) atmosphérique et, par conséquent, elles peuvent se développer avec air et eau contenant quelques sels minéraux essentiels. Néanmoins, de nombreuses cyanobactéries sont également capables d'absorber certains sucres car sources de carbone et d'énergie et certains acides aminés comme sources d'azote, ce qui augmente les modes trophiques de ces organismes (**Floresa et al., 2019**).

5. Reproduction

La division cellulaire chez les cyanobactéries s'effectue par voie amitotique ou fission binaire qui à partir d'une cellule maternelle engendre deux cellules filles ; c'est le mécanisme courant chez cet embranchement qui assure la multiplication (végétative c'est à dire asexuée). (**Frémy et Lassus, 2001**). La fragmentation des cyanobactéries filamenteuses peut générer des petites filaments mobiles appelés hormogonies (**Prescott et al., 2003**).

CHAPITRE II :

La potentialité des cyanobactéries thermophiles

1. Microorganismes thermophiles

Les thermophiles sont des microorganismes de type extrêmophiles unicellulaires (bactéries, protistes) et plus rarement, pluricellulaires (algues, champignons) ayant besoin d'une température élevée pour se développer. La température la plus élevée pour les algues se situe dans les 50 °C et près de 70 °C pour les cyanobactéries (Alain *et al.*, 2002 ; Sechbach, 2007). Les hyper thermophiles sont une classe des thermophiles qui ne peuvent vivre qu'au-dessus de 60°C (Madigan *et al.*, 2003).

1.1. Classification des microorganismes thermophiles

La relation des organismes vivants à la température a longtemps été considérée en biologie comme un élément de base de classification. Trois groupes majeurs sont définis selon les températures optimales de croissance (T_{opt}) : les psychrophiles qui ont des T_{opt} inférieures à 20°C, les mésophiles qui poussent de façon optimale entre 20 et 45°C et les thermophiles qui se développent à des températures supérieures à 45°C (fig. 5) (Alain *et al.*, 2002).

Selon Karl Stetter 1999, le groupe des thermophiles se divise en trois sous catégories :

- Les **thermophiles modérés**, dont les conditions optimales de croissance se situent entre 55 et 65°C ;
- Les **thermophiles extrêmes**, dont la température optimale de croissance est comprise entre 65 et 80°C ;
- Les **hyper thermophiles**, dont la température optimale de croissance est supérieure à 80°C ;

1.2. Cyanobactéries thermophiles

Certaines cyanobactéries sont adaptées à des environnements tels que les sources chaudes. Ils peuvent tolérer des températures élevées, un pH acides et des conditions variables d'éclairage toujours changeantes (Summerfield *et al.*, 2008).

Les sources chaudes de plusieurs milieux à travers le monde sont colonisées par les cyanobactéries filamenteuses thermophiles appartenant aux genres : *Calothrix*, *Oscillatoria*, *Phormidium*, *Pseudanabaena*, *Synechococcus*, *Synechocystis* et *Spirulina*. Les membres de deux genres *Phormidium* et *Synechococcus* sont fréquents dans ces habitats thermiques (Ballot, 2004).

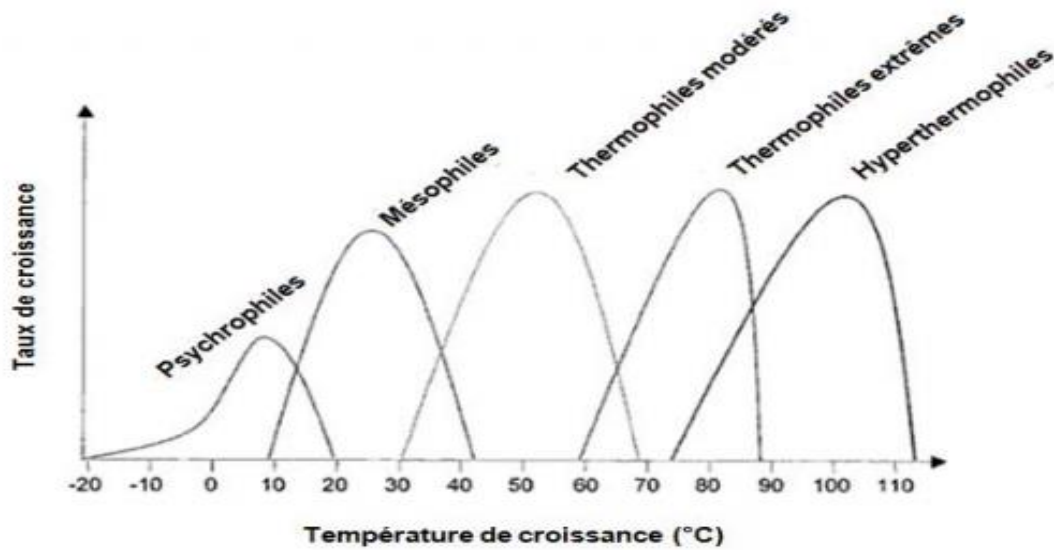


Figure 05 : Division des organismes vivants selon leur température de croissance (**Madigan et al., 2003**).

Les cyanobactéries peuvent croître ou maintenir la vie par encapsulation jusqu'à une température avoisinant 70 à 80 °C. C'est donc dans les eaux thermales marines ou douces que l'on peut les trouver. *Mastigocladus laminosus* pousse à 55°C et peut survivre à 64°C (**Gudin, 2013**).

1.3. Ecologie des cyanobactéries thermophiles

Les plus importants biotopes thermophiles naturels, le plus souvent associés à une activité volcanique, sont les sources thermales terrestres ainsi que les environnements hydrothermaux marins côtiers et abyssaux (fig. 06) (**Castenholz, 1969**).

D'autres habitats chauds non géothermiques sont très rares dans la nature. Par exemple, les étangs chauffés par l'énergie solaire et les composts chauffés biologiquement peuvent provoquer des températures élevées, mais ces derniers présentent des écosystèmes très transitoires qui seront principalement colonisés par une croissance rapide des spores (**Hobel, 2004**).

Des écosystèmes chauds artificiels ont été également créés. Il s'agit notamment des canalisations d'eaux chaudes, les déchets des usines de traitement ou des procédés des industries alimentaires ou chimiques. La biodiversité microbienne des écosystèmes artificiels chauds a révélé la présence de plusieurs thermophiles connus, comme le genre *Thermus* (**Rad, 1992**). *Thermus scotoductus*, bacille productrice de pigments, a été d'abord isolé à partir de l'eau chaude du robinet en Islande (**Kristjansson et al., 1994**), ce dernier a été montré par la

suite endémiques d'une large majorité de sources hydrothermales neutres à alcalins (Hjorleifsdottir *et al.*, 2001) Cependant, ces écosystèmes constituent des sites spécifiques et uniques d'isolement de l'espèce *Thermoplasma acidophilum* (Darland *et al.*, 1970; Kristjansson et Stetter, 1992).

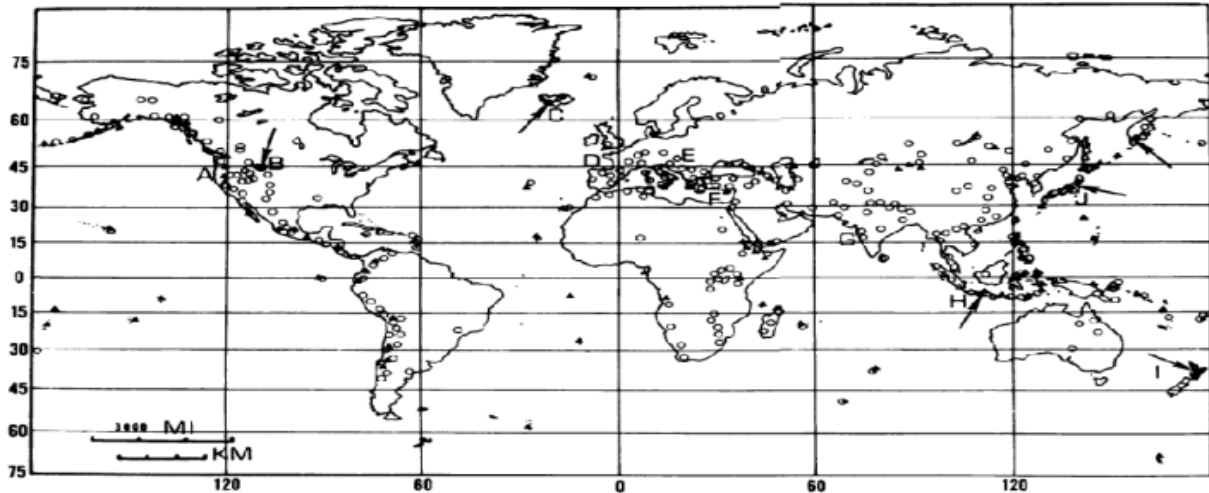


Figure 06 : Répartition mondiale des zones géothermiques où les microorganismes thermophiles ont été isolés (Castenholz, 1969).

[A, l'Oregon ; B, le parc de Yellowstone ; C, l'Islande ; D, la France ; E, la Hongrie, la Tchécoslovaquie et la Yougoslavie ; F, la Grèce et Palestine ; G, l'Inde ; H, l'Indonésie ; I, la Nouvelle-Zélande et J, le Japon].

1.4. Thermalisme en Algérie

Les traces retrouvées dans les stations thermales remontent à l'époque romaine. En effet les romains accordaient une importance très particulière aux sources thermales, très souvent ils construisirent leurs sites autour de ces sources, comme c'est le cas pour les sites suivants : *Aquae Mauretaniae Cesarienne* (Hammam Righa) ; *Aquae Sirenses* (Hammam Bouhanifia) ; *Aquae Chibilita Nae* (Hammam Dbegh).

Accordant de l'importance à l'hygiène corporelle, les Arabes renouèrent avec les sources thermales sans en faire un cadre de vie comme les Romains. Hammam (bain chaud) est la dénomination donnée à l'ensemble des sources fréquentées. Aujourd'hui comme dans le passé les stations thermales sont très sollicitées par les algériens pour divers traitements d'ordre rhumatologique et dermatologique (Boughlali, 2003 ; Ouali, 2008).

Il existe sur le territoire algérien plus de 240 sources thermales. D'après les études réalisées à ce sujet, ce nombre croît régulièrement quand on se déplace vers l'Est. Les

températures mesurées à l'émergence varient de 19 à 98°C. La température la plus élevée enregistrée pour la zone ouest est : 68°C (Hammam Abou Hanifia), 80°C pour la zone centrale (Hammam El Biban) et 98°C pour la zone de l'Est (Hammam Dbegh). Dans la zone sud, il existe des sources thermales avec une température moyenne de 50°C. Ceux sont surtout les régions du nord-est et celle du nord-ouest qui comptent le plus grand nombres de sources thermales (figure N°7) (Ouali, 2008 ; Saibi, 2009).



Figure 07 : Répartition des sources thermales dans le Nord algérien (Fekraoui *et al.*, 1999).

2. Applications des cyanobactéries thermophiles

Ces dernières années, les micro-organismes thermophiles ont été largement utilisés pour leur potentiel biotechnologique, notamment dans les procédés industriels. La biotechnologie industrielle permet la production de grandes quantités de produits chimiques, de substances polymériques et de biocarburants. Il est basé sur le bio-traitement traditionnel des matières premières et nécessite des bioréacteurs en acier inoxydable bien équipés, des procédures de stérilisation compliquées et un traitement en aval coûteux (Chen et Jiang, 2018).

Les applications biotechnologiques des cyanobactéries dans divers domaines, tels que l'agriculture, le contrôle de la pollution (biorestauration), la bioénergie et les biocarburants et les nutraceutiques ont été bien documentées. De plus, ils sont connus pour produire une large gamme de composés bioactifs pharmaco-logiquement importants (par exemple : antibactériens, antifongiques, antiviraux, anticancéreux, relaxants musculaires) et des produits de grande

valeur commercialement importants, tels que les acides gras polyinsaturés (AGPI) et les phycobiliprotéines (fig. 08) (Pandey *et al.*, 2013).

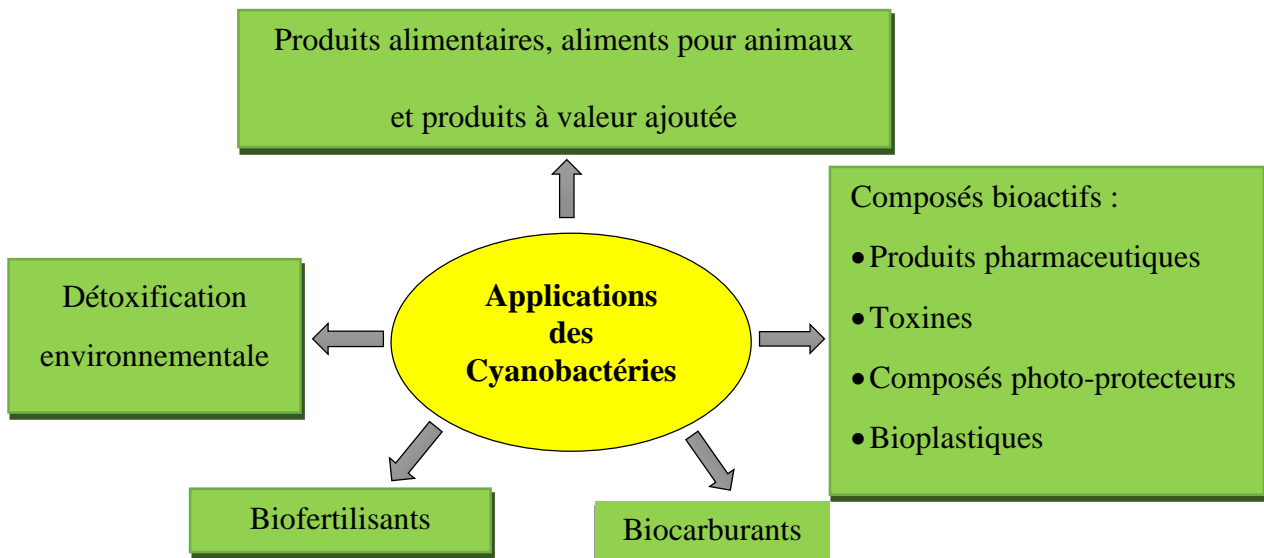


Figure 08 : Représentation schématique montrant l'application des cyanobactéries en biotechnologie (Kumar *et al.*, 2019).

Les cyanobactéries sont une excellente source de produits naturels et un grand nombre de composés bioactifs ont été isolés, y compris les produits pharmaceutiques, les enzymes, les colorants, les bioplastiques, les toxines et divers autres composés. La plupart des composés bioactifs dérivés des cyanobactéries, mais pas tous, sont des alcaloïdes, des amides, des acides gras, des peptides ou des macrolides, ou leur combinaison (Dittmann *et al.*, 2001). Les composés bioactifs importants produits par les cyanobactéries comprennent les lipopeptides (40 %), les amides (9 %), les acides aminés (5,6 %), les acides gras (4,2%) et les macrolides (4,2%) (Burja *et al.*, 2001)

2.1. Produits pharmaceutiques

Les cyanobactéries constituant une riche source de divers métabolites secondaires qui peuvent agir comme antibiotiques, enzymes, anticancéreux et anti-inflammatoires. Les cyanobactéries sont connues pour la biosynthèse de plusieurs métabolites ayant des activités ; antimicrobiennes, immunosuppressives, anticancéreuses et antivirales. Ces microorganismes sont donc industriellement importants pour la production de produits pharmaceutiques importants (Rajneesh *et al.*, 2017).

2.1.1. Composés antimicrobiens

Les composés antimicrobiens sont l'agent qui tue ou inhibe la croissance des microorganismes en affectant leurs processus physiologiques. En raison de l'émergence croissante de souches bactériennes multi-résistantes (MDR), de sérieuses tentatives sont faites pour découvrir/développer de nouveaux médicaments à partir de différents organismes. Plusieurs cyanobactéries sont maintenant connues pour produire des composés bioactifs intracellulaires et extracellulaires avec de puissantes activités antibactériennes et antifongiques (**Rao, 1994 ; Kulik, 1995 ; Schlegel et al., 1999**). Ces composés cyanobactériens ont montré une activité contre *Micrococcus flavus*, *Bacillus subtilis*, *E. coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Serratia marcescens*, *Mycobacterium smegmatis*, *Streptococcus pyogenes* et quelques autres bactéries Gram-positives et Gram-négatives (**Østensvik et al., 1998 ; Ananya et Ahmad, 2014**). De nombreux composés cyanobactériens ont également montré des activités antifongiques contre différentes souches pathogènes de champignons (**Pfaller et Diekema, 2007 ; Pawar et Puranik, 2008**). Cependant, la production d'agents antimicrobiens dépend de la composition du milieu de culture, de la période d'incubation, du pH, de la température et de l'intensité lumineuse pendant la croissance des cyanobactéries sélectionnées (**Noaman et al., 2004**).

2.1.2. Composés antiviraux

Certaines micro-algues et cyanobactéries produisent des protéines présentant des propriétés antivirales. Il s'agit principalement de glycoprotéines pouvant être apparentées aux lectines. C'est le cas notamment de la cyanovirine -N produite par les cyanobactéries *Nostoc ellipsorum* qui présente une forte activité antivirale à l'encontre notamment du virus l'immunodéficience humaine (VIH) et de celui de l'herpès (Tab. 02). (**Fleurence, 2003**).

2.1.3. Composés anti-protozoaires

De nombreux composés bioactifs de cyanobactéries présentent des effets inhibiteurs contre les protozoaires tels que *Plasmodium* (malaria), *Trypanosoma* (maladie du sommeil), *Leishmania* (leishmaniose), etc. (**Berman, 1998**). Les venturamides A et B isolés de la cyanobactérie marine *Oscillatoria sp.* ont été rapportés pour montrer une activité antiplasmodiale. la nostocarboline, un alcaloïde carbolinium quaternaire isolé de la cyanobactérie *Nostoc 78-12A* a provoqué de forts effets inhibiteurs sélectivement sur *Plasmodium falciparum*, même à très faible concentration (**Barbaras et al., 2008**). L'aérocyclamide B, un peptide cyclique ribosomique isolé de *M. aeruginosa*, a suscité une forte

activité antiplasmodium. L'aérocyclamide a également présenté une activité appréciable contre *Trypanosoma (T. brucei)* (Portmann *et al.*, 2008). Les rapports disponibles suggèrent clairement que les membres des cyanobactéries synthétisent des composés antiplasmodiaux, mais il est nécessaire de cribler de nombreuses autres souches pour obtenir un composé puissant pour la production à grande échelle et le traitement des maladies paludéennes (Peña *et al.*, 2012).

Tableau 02 : Composés bioactifs importants isolés des cyanobactéries.

Composés	Organismes	Réponse d'activité	Références
Muscoride A	<i>Nostoc muscorum</i>	Antibactérien	Nagatsu <i>et al.</i> , (1995)
Cyanobactérine	<i>Scytonema hofmanni</i>	Antifongique	Swain <i>et al.</i> , (2017)
Nostoflan	<i>Nostoc flagelliforme</i>	Actif contre l'herpès simplex virus (HSV-1 et HSV-2), cytomégalovirus et le virus de la grippe.	Hayashi <i>et al.</i> , (2008)

2.1.4. Composés anti-cancéreux

Les cyanobactéries thermophiles synthétisent des composés bioactifs possédant des activités anticancéreuses. Il a été rapporté que certains composés dérivés des cyanobactéries marines interagissent avec des cibles moléculaires spécifiques conduisant à un mort contrôlé des cellules tumorales. Ces composés sont principalement impliqués dans l'arrêt du cycle cellulaire, les dysfonctionnements mitochondriaux, les dommages oxydatifs et les altérations de la cascade des caspases, protéases noncaspases, famille de protéines Bcl-2 et dynamique des canaux sodiques membranaires (Costa *et al.*, 2012). Dans une autre étude, la supplémentation orale d'extrait de *Spirulina fusiformis* a entraîné une inhibition de la leucoplasie homogène. Certains composés des extraits de Spiruline ont réprimé la cancérogenèse induite chimiquement chez le hamster modèle buccal sachets (Schwartz *et al.*, 1988; Singh *et al.*, 2005). (Swain *et al.* 2015) ont étudié les composés anticancéreux de différentes espèces de *Lyngbya* et testé leurs effets ciblés sur des lignées cellulaires cancéreuses.

2.2. Cyanotoxines

Les toxines des cyanobactéries, également nommées «cyanotoxines », sont des métabolites dont les effets sont avérés sur la santé animale ou humaine. Traditionnellement, ces cytotoxines trouvées dans les bioscreens dans la recherche de produits pharmaceutiques n'ont

pas été considérées comme des toxines cyanobactériennes. Les cyanotoxines sont regroupées en trois principales familles en fonction de leurs effets toxiques et leur composition : les hépatotoxines, les neurotoxines et les dermatotoxines (Sivonen, 2009 ; Bernard *et al.*, 2017).

2.2.1. Hépatotoxines

Les microcystines (hépatotoxines) sont les toxines les plus fréquemment produits par les cyanobactéries et elles sont responsables de la plupart des intoxications humaines et animales décrites. Elles sont synthétisées par certaines espèces (*Microcystis*, *Anabaena*, *Planktothrix*) que l'on retrouve majoritairement dans nos plans d'eau (Tab. 03) (Ginocchio et Louis Viollet, 2009).

2.2.2. Dermatotoxines

Elles sont généralement associées aux environnements marins dans les climats tropicaux et subtropicaux, et comprend les toxines Lyngbya. Le contact avec leurs filaments peut provoquer une dermatite sévère chez les nageurs. Ils peuvent provoquer une inflammation orale et gastro-intestinale s'ils sont ingérés. Certaines de ces toxines sont également de puissants promoteurs de tumeurs. (Encyclopédie, 2010).

2.2.3. Neurotoxines

Regroupées en deux familles : les anthoxines et les aphantoxines. Ce sont des alcaloïdes spécifiques, synthétisées principalement par : *Anabaena* et *Apbanizomenon* (Carmichael, 1992).

Tableau 03 : Espèces de cyanobactéries productrices de toxines communes et leur activité biologique.

Toxines	Organismes	Activités	Références
Nodularine	<i>Nodularia</i>	Hépatotoxique	(Yoshizawa <i>et al.</i> , 1990)
Kamkitoxine	<i>Lyngbya</i>	Neurotoxique	(Singh <i>et al.</i> , 2005)
Lipopolysaccharides	<i>Anabaena</i> , <i>Microcystis</i> , <i>Oscillatoria</i> , <i>Spirulina</i>	Dermatotoxique	(Rastogi <i>et al.</i> , 2015)

2.3. Bioplastiques

Les plastiques sont très importants et largement utilisés dans les automobiles, les appareils ménagers, le matériel informatique, les emballages et les équipements médicaux.

Cependant, les plastiques sont principalement dérivés de produits pétrochimiques non renouvelables et ne sont pas biodégradables, ce qui entraîne de graves problèmes environnementaux, en particulier pour la santé humaine. Ces dernières années, les chercheurs ont développé un intérêt considérable pour le remplacement de ces plastiques dérivés de la pétrochimie par des plastiques biodégradables (bioplastiques) qui sont synthétisés à partir de ressources durables telles que les huiles végétales, les graisses, l'amidon de maïs et les micro-organismes (**Chua et al., 1999; Chen et Patel, 2012**). La production à grande échelle de bioplastiques compte tenu du faible coût de production et des problèmes environnementaux minimes, en particulier l'émission de CO₂ (**Balaji et al., 2013**).

Les cyanobactéries produisent principalement des polyesters linéaires de polyhydroxyalcanoates (PHA), un thermoplastique cristallin avec des propriétés comparables au plastique synthétique, le polypropylène. Parmi les PHA, le polyhydroxybutyrate (PHB) est le plus courant et il est produit par plusieurs espèces de cyanobactéries. Le PHB est de nature hautement hydrophobe et présente des propriétés thermoplastiques de transformation, de biodégradabilité et de biocompatibilité (**Holmes, 1985; Hai et al., 2001**) La production de PHB a été signalée chez différentes espèces de *Chlorogloea*, *Chlorogloea fritschii*, *Spirulina*, *Aphanothece*, *Gloeothece* et *Synechococcus* (**Campbell et al., 1982; Capon et al., 1983; Miyake et al., 1996; Wu et al., 2001; Balaji et al., 2013**).

2.4. Teintures et colorants

Les cyanobactéries produisent différents types de pigments qui sont utilisés comme colorants, et colorants fluorescents utilisés comme des colorants alimentaires et pour d'autre fin de recherche. La chlorophylle, les phycobiliprotéines (c-phycoyanine, c-allophycoyanine et c-phycoérythrine) et les caroténoïdes sont les principaux pigments. Ces pigments ont une valeur commerciale en tant qu'agents de coloration naturels, des médicaments, aussi utilisés dans les industries cosmétiques, pour améliorer la santé et la fertilité du bétail et également utilisés dans le domaine biomédicale (**Uzair et al., 2012 ; Pandey et al., 2013**). Les phycobiliprotéines sont largement utilisées comme colorants naturels dans les produits alimentaires tels que les chewing-gums, les produits laitiers fermentés, les glaces, les boissons gazeuses, les desserts, les décorations de gâteaux sucrés, les gelées, les milkshakes, etc. (**Santiago-Santos et al., 2004 ; Sonani et al., 2016**).

Les caroténoïdes sont le groupe le plus répandu de pigments naturels produits à la fois par les procaryotes et les eucaryotes, y compris les cyanobactéries, les principaux caroténoïdes

comprennent la zéaxanthine, l'échinonone, le β -carotène et la canthaxanthine. Le β -carotène est le plus courant parmi eux. Ces pigments protègent les cellules des dommages photooxydatifs et sont utilisés dans l'environnement, l'alimentation et la nutrition, et le contrôle des maladies (**Kushwaha et al., 2014**). Le β -carotène est utilisé sous forme de solution ou de suspensions pour colorer les huiles végétales, la margarine, les produits de boulangerie, les boissons à l'orange, les confiseries et autres aliments préparés (**Vandamme, 1989**).

2.5. Composés photo-protecteurs

Au cours des deux dernières décennies, l'utilisation de composés photoprotecteurs naturels a attiré beaucoup d'attention compte tenu des problèmes de sécurité, car plusieurs composés synthétiques de protection solaire présentent une toxicité et sont sujets de la photodégradation (**Serpone et al., 2007**).

Les cyanobactéries thermophiles produisent une vaste gamme de composés/pigments photoprotecteurs qui sont maintenant largement utilisés dans la formulation des cosmétiques, le seul objectif étant de réduire les risques de cancer de la peau et de vieillissement. Parmi ceux-ci, les acides aminés de type mycosporine (AAM), la scytonémine et les caroténoïdes sont les plus courants et signalés chez plusieurs espèces de cyanobactéries, en particulier celles exposées à des stress abiotiques, notamment de fortes doses de rayonnement UV (**Rastogi et Sinha, 2009 ; Gao et Garcia- Pichel, 2011**).

2.6. Biofertilisants

Depuis plusieurs décennies, les utilisations d'engrais chimiques ont été énormément utilisées. Leur utilisation fréquente a des effets néfastes sur l'environnement et les cultures. Le motif principal de ses applications est l'amélioration du rendement des cultures. Les biofertilisants ont de nombreux côtés positifs sans aucun effet néfaste sur la nature. Les biofertilisants sont des micro-organismes qui enrichissent le sol en éléments nutritifs en améliorant la disponibilité des éléments nutritifs pour les cultures. On cite comme exemple le Biofertilisant Microphos : *B. polymyxa*, *Pseudomonas striata*, *Aspergillus* (**Joshi et al ., 2020**).

Les cyanobactéries thermophiles elles enrichissent la fertilité du sol en fixant l'atmosphère N_2 entraînant une croissance et un rendement accru du riz. Outre la fixation de N_2 , ils produisent divers types de croissance hormones, vitamines, composés bioactifs, acides organiques, composés antagonistes et jouent un rôle important dans les nutriments cyclisme (**Singh et al., 2016**).

2.7. Compléments alimentaires

Ces derniers temps, la souche cyanobactérienne la plus fréquemment utilisée pour sa valeur nutritionnelle humaine est la Spiruline (*Arthrospira*), en raison de ses immenses teneurs en protéines et valeurs nutritives significatives. Selon certaines analyses statistiques, 1 Kg de *Spirulina* peut remplacer 1000 Kg de fruits et légumes diversifiés en termes de valeur nutritive. Quelques membres cyanobactériens (par exemple Spiruline, *Anabaena* et *Nostoc*) sont consommés comme compléments alimentaires dans plusieurs pays comprenant Mexique, Chili, Pérou et Philippines. *Spirulina platensis* est cultivée sur un à grande échelle utilisant soit des bassins d'aqueduc, soit des photo bioréacteurs sophistiqués et promus sous forme de flocons, de poudre et de comprimés ou de capsules. Il comprend plus de 60% de protéines, un large spectre d'action prophylactique et nutriments thérapeutiques contenant du bêta-carotène, de la thiamine, de la riboflavine, du complexe B vitamines, minéraux, oligo-éléments et de nombreux surprenants composés bioactifs. (Chittora *et al.*, 2020).

Les cyanobactéries thermophiles sont la source la plus riche en vitamines. Par exemple, la Spiruline (*Arthrospira*) s'avère riche en vitamine B12 (deux à six fois plus riche que le foie de bœuf cru) et en vitamine E, avec 20 g de Spiruline répondant aux besoins quotidiens de l'organisme en Vitamine B12 et 70 % de B1 (thiamine), 50 % de vitamine B2 (riboflavine) et 12 % de vitamine B3 (niacine). Il contient également des nutriments, notamment d'autres vitamines du complexe B, du bêta-carotène, de la vitamine E, du manganèse, du zinc, du cuivre, du fer, du sélénium et de l'acide linoléique (un acide gras essentiel) (Gupta *et al.*, 2013).

2.8. Potentialités agricoles

Les cyanobactéries ont la capacité de fixer le N₂ atmosphérique, décomposer les déchets organiques et résidus, dé-toxifier les métaux lourds, les pesticides et autres xénobiotiques, catalyser le cycle des nutriments, supprimer la croissance des agents pathogènes micro-organismes dans le sol et l'eau, et produisent également des composés bioactifs tels que vitamines, hormones et enzymes qui contribuent à la croissance des plantes (Higa, 1991). Ces bio-agents peuvent améliorer la qualité du sol et la croissance des plantes, et minimiser le coût de production des cultures en complétant la bonne récolte pratiques de gestion telles que la rotation des cultures, l'utilisation de le fumier, le travail minimum du sol et la lutte biologique contre les ravageurs et maladies. L'utilisation des cyanobactéries en agriculture promet des effets bénéfiques sur la productivité des cultures, s'il est utilisé correctement (Higa et Wididana, 1991).

2.9. Biocarburants

En raison de l'épuisement des ressources en combustibles fossiles et de l'augmentation du réchauffement climatique, il est nécessaire de développer alternatives pour remplacer ou substituer les combustibles fossiles. Les cyanobactéries sont utilisées pour produire des biocarburants car elles offrent un certain nombre de d'avantages uniques en termes d'être photoautotrophe, respectueux de l'environnement, facile à cultiver sous une grande variété de climats et conditions, renouvelables, et moins d'émissions de CO₂ pendant la production et l'application (**Lindbald, 1999**). La biomasse peut être convertie en sources d'énergie par de nombreuses méthodes et fournit ainsi une matière première pour la production de biocarburants comme le biohydrogène, le biodiesel, le bioéthanol, le biogaz, etc. (**Pinzon-Gamez et al., 2005**).

Des chercheurs ont eu l'idée de modifier les voies métaboliques des cyanobactéries afin de leur faire fabriquer des biocarburants ou d'autres molécules chimiques, en présence de CO₂ atmosphériques et de lumière solaire. Le potentiel de ce type d'approche est phénoménal car non seulement il réduit l'utilisation des énergies fossiles (pétrole, gaz), mais de plus il peut aider à diminuer la concentration de CO₂ atmosphérique, contribuant à restreindre l'augmentation de température à la surface du globe (**Guy-franck, 2021**).

2.10. Dépollution

Il a été rapporté qu'un certain nombre d'espèces cyanobactériennes accumulent, détoxifient, ou métabolisent les métaux lourds, les radionucléides, les métalloïdes et les oxydations par absorption médiée par la surface ou en s'acclimatant à l'environnement chimique environnant (**Mallick, 2002 ; Visscher et Stolz, 2005**). **Andrade et ses collègues (2004)** ont démontré que *Synechocystis aquatilis* NPBS-3 (isolé des sites contaminés par les métaux de la baie de Sepetiba, Brésil) utilise des granules de polyphosphate par un mécanisme non spécifique pour piéger et accumuler le zinc et détoxifier le métal permettant à l'organisme de se développer dans la baie. Plusieurs espèces de cyanobactéries à savoir, *Lyngbya majuscula*, *A. variabilis*, *Anabaena doliolum*, *Phormidium sp.*, *Oscillatoria salinas* et *Nostoc muscorum* sont bien connus pour dégrader les effluents de l'industrie textile et accumuler/détoxifier les métaux lourds (**Vijayakumar et Manoharan, 2012 ; David et al., 2014**). De même, les chthonoplastes *Microcoleus* et *Phormidium corium* sont connus pour dégrader les n-alcanes tandis qu'*Oscillatoria sp.* et *A. quadruplicatum* peut oxyder le naphthalène en 1-naphtol (**Al-Hasan et al., 1998**).

CONCLUSION

Les cyanobactéries représentent une source énorme pour la production d'une variété de molécules bioactives, qui peuvent être utilisées pour la conservation et le développement durable de l'environnement.

L'utilisation des cyanobactéries dans les industries offre de multiples avantages par rapport aux autres organismes car ils sont répartis de manière ubiquitaire dans le monde entier. Leur type trophique photo-autotrophe permet de les maintenir facilement dans les conditions de laboratoire avec une exigence minimale de nutriments. Ces caractéristiques uniques des cyanobactéries en font un candidat potentiel pour la production de biomolécules/composés bioactifs à grande échelle au niveau commercial à faible coût.

Les progrès du génie génétique et de la biotechnologie ont fait des cyanobactéries thermophiles une option intéressante pour la production de métabolites secondaires par manipulation génétique des gènes souhaités. Au cours des dernières années, les approches de génie génétique ont joué un rôle important dans l'amélioration de la souche et ont abouti à la production d'un certain nombre de produits à valeur ajoutée. De nombreux composés de cyanobactéries ont été isolés et identifiés comme composés antimicrobiens, antiviraux, anticancéreux, anti protozoaires, photoprotecteurs et toxines qui sont couramment utilisés à des fins pharmaceutiques et à plusieurs autres fins. Ils sont également utilisés pour la production alimentaire à grande échelle. Suppléments et aliments pour animaux qui peuvent fournir et satisfaire la demande alimentaire pour la population mondiale croissante, aidant ainsi dans le maintien de la sécurité et de la viabilité économique des êtres humains et des animaux.

De plus, les biocarburants de cyanobactéries thermophiles peuvent servir de source prometteuse pour réduire la pollution de l'environnement en raison de leur nature respectueuse de l'environnement. Ces microorganismes fonctionnent également comme une composante inévitable de l'agriculture durable en raison de leur capacité de fixation du N₂ et de la production de substances favorisant la croissance et le développement des plantes.

Au cours des dernières années, les cyanobactéries thermophiles ont été exploitées de manière lucrative dans divers domaines de recherche et de développement, notamment l'agriculture, l'industrie pharmaceutique, la bio-remédiation et la production de biocarburants. Cependant, d'autres investigations sont nécessaires pour l'amélioration de ces recherches. En utilisant des nouveaux outils et des techniques de biotechnologie afin d'obtenir des produits de haute qualité.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

- Abed R.M.M., Dobretsov S., Sudesh K. (2008). Applications of cyanobacteria in biotechnology. *Journal of Applied Microbiology*, p3.
- Adams D. G., Duggan P. S. (2008). Cyanobacteria–bryophyte symbioses. Vol 59, p 1058.
- Alain K., Marteinsson V.T., Miroshnichenko M.L., Bonch-Osmolovskaya E.A., Prieur D., Birrien J.L. (2002). *Marinitoga piezophila* sp. nov., a rod-shaped, thermo-piezophilic bacterium isolated under high hydrostatic pressure from a deep-sea hydrothermal vent. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*. 52, p 1331–1339.
- Al-Hasan R.H., Al-Bader D.A., Sorkhoh N.A., Radwan S.S. (1998). Evidence for n-alkane consumption and oxidation by filamentous cyanobacteria from oil-contaminated coasts of the Arabian Gulf. *Mar. Biol.* 130, p 521–527.
- Ananya A. K. and Ahmad I. Z. (2014). Cyanobacteria "the blue green algae" and its novel applications: A brief review, *Int. J. Innov. Appl. Stud.*, vol.7, p.251-261.
- Andrade L., Keim C.N., Farina M., Pfeiffer W.C. (2004). Zinc detoxification by a cyanobacterium from a metal contaminated bay in Brazil. *Braz. Arch. Biol. Technol* 47, p 147–152.
- Balaji S., Gopi K., Muthuvelan B. (2013). A review on production of poly β , hydroxybutyrates from cyanobacteria for the production of bioplastics. *Algal Res.* 2, p 278–285.
- Ballot A. (2004). Cyanobacteria in Kenyan Rift Valley lakes – A biological and toxicological study. Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades des Doktors der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.) eingereicht im Fachbereich Biologie, Chemie, Pharmazie der Freien Universität Berlin, p 274-301.

- Barbaras D., Kaiser M., Brun R., Gademann K. (2008) .Potent and selective antiplasmodial activity of the cyanobacterial alkaloid nostocarboline and its dimmers. *Bioorg. Med. Chem.Lett.* 18, p 4413–4415.
- Bartram C.J. (1999) .Toxic Cyanobacteria in Water: A guide to their public health consequences, monitoring and management, p 30.
- Berman J. (1998). Chemotherapy of leishmaniasis: recent advances in the treatment of visceral disease. *Curr. Opin. Infect. Dis.* 11, p 707–710.
- Bernard C., Mougin C., Péry A. (2017). Ecotoxicologie, des communautés au fonctionnement des écosystèmes. ISTE Edition Ltd, p 52.
- Bertrand F., Dunand A., Fosse J., Fradin N., Liger D., Gérard K. (2004). Toxicologie Environnementale .Les intoxications par les cyanobactéries, p50.
- Boughalali M. (2003). Thermalisme et thalassothérapie en Algérie. *Presse thermal et climaiquet* ; 140, p 161-165.
- Boussebouaa H. (2002).Elément de microbiologie générale. Editions de l'Université Mentouri Constantine (Algérie), p81-82.
- Brock T.D., Freeze H. (1969).*Thermusaquaticus* gen. n. and sp. n. a non-sporulating extremethermophile. *The Journal of Bacteriology.* 98, p 289 -297.
- Burja A.M., Banaigs B., Abou-Mansour E., Burgess G., Wright P.C. (2001). Marine Cyanobacteria: a prolific source of natural product. *Tetrahedron .Lett.* 57, p 9347–9377.
- Campbell J., Stevens Jr. S.E., Balkwill D.L. (1982). Accumulation of poly- β -hydroxybutyrate in *Spirulina platensis*. *J. Bacteriol.* 149, p 361–363.

- Capon R.J., Dunlop R.W., Ghisalberti E.L., Jefferies P.R. (1983). Poly-hydroxyalkanoates from marine and freshwater cyanobacteria. *Phytochemistry* 22, p 1181–1184.
- Carmichael W.W. (1992). Cyanobacteria secondary metabolites-the cyanotoxins; *Journal of Applied Bacteriology*, vol. 74, p 445-459.
- Carrabin D. (2011). Détection et identification moléculaires des populations cyanobactériennes productrices de microcystines au Québec, p5.
- Castenholz R.W. (1969). Thermophilic blue-green algae and the thermal environment. *Bacteriological Reviews*. 33, p 476-504.
- Cécile B. (2014). Les cyanobactéries et leurs toxines .Elsevier Masson SAS, p460.
- Chen G.Q., Jiang X.R. (2018). Next generation industrial biotechnology based on extremophilic bacteria. *Curr Opin Biotechnol*. 50, p 94-100.
- Chen G.Q., Patel M.K. (2012). Plastics derived from biological sources: present and future: a technical and environmental review. *Chem. Rev.* 112, p 2082–2099.
- Chittora D, Meena M, Barupal T, Swapnil P. (2020). Cyanobacteria as a source of biofertilizers for sustainable agriculture, Department of Botany, Mohanlal Sukhadia University, Udaipur, 313001, Rajasthan(India), p20.
- Chua, H., Yu., P.H.F., Ma, C.K. (1999). Accumulation of biopolymers in activated sludge biomass. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 78, p 389–399.
- Costa, M., Costa-Rodrigues, J., Fernandes, M.H., Barros, P., Vasconcelos, V., Martins, R. (2012). Marine cyanobacteria compounds with anticancer properties: a review on the implication of apoptosis. *Mar. Drugs*. 10, p 2181–2207.

- Darland G., Brock T.D., Samsonoff W., Conti S.F. (1970). A thermophilic, acidophilic mycoplasma isolated from a coal refuse pile. *Science*. 170, p 1416-1418.
- Davet P. (1996). Vie microbienne du sol et production végétale. Institut National de la recherche Agronomique .Rue de l'Université (Paris), p48.
- David G. A., Paula S. D. (1999). Heterocyst and akinete differentiation in cyanobacteria, p185.
- David N.S., Rajan M.R., Sivakumar P. (2014). Cyanobacteria as a potential source of phycoremediation from textile industry effluent. *J. Microbiol. Biotechnol. Res.* 4, p30–35.
- Delarras C. (2010). Photosynthesis and respiration in cyanobacteria. Arizona state university (USA), p 158.
- Delarras C. (2014).Pratique en microbiologie de laboratoire Recherche de bactérie et de levure-moisissure. Edition Céline Poiteaux, p56.
- Dittmann E., Neilan B., Börner T. (2001) .Molecular biology of peptide and polyketide biosynthesis in cyanobacteria. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 57, p 467–473.
- Dumont V. (2006). Etude des cyanobactéries dans la rivières Tarn-Toulouse, Centre de Ressources Technologiques en Biotechnologie, p 20.
- El herry S. (2008). Biodiversité en cyanobactéries toxiques dans la retenue du barrage Lebna (Tunisie) : caractérisations morphologique et moléculaire et évaluation du potentiel toxique des différentes morphoespèces du genre *Microcystis spp.* Isolées des divers plans d'eau en Algérie et en Tunisie. Thèse de doctorat. Université Paris 11 , p298.
- Encyclopédie. (2010).Desalination and water resources (water health), volumeII.Encyclopedia of life support system. United Kingdom: EOLSS Publisher CO. Ltd, p 416.

- Farineau J., Fancois G.F. (2017).la photosynthèse processus physiques, moléculaire et physiologiques, édition juliette blanchet, p54.
- Farineau J., Morot-Gaudry J.F. (2005). La photosynthèse processus Physiques, moléculaires et physiologiques, institut national de le la recherche agronomique 147, rue de l'université, p 243.
- Fekraoui A., Abouriche A. (1999).Ressources géothermiques du Nord de l'Algérie. Eléments de l'Atlas Géothermique. Revue des Energies Renouvelables ; 6, p159-162.
- Fleurence J. (2003) .les microalgues de l'aliment du futur à l'usine cellulaire. Édition Ltd 27-37StGeorge is London, p 177.
- Floresa E., Arévaloa S., Burnat M. (2019). Cyanophycin and arginine metabolism in cyanobacteria, Department of Marine Biology and Oceanography, Institut de Ciències del Mar, CSIC, Passeig Marítim de la Barceloneta 37-49, E-08003 Barcelona, Spain,p10.
- forêt R. (2018). Dictionnaire des sciences de la vie, rue du bosquet, 7, Louvain-la-Neuve, p1278.
- Frémy J M., Lassus P. (2001).toxines d'algues d'alimentation. IFREMER, Afssa, Ministère de l'Environnement. (France), p(21).
- Gao Q., Garcia-Pichel F. (2011). Microbial ultraviolet sunscreens. Nat. Rev. Microbiol. 9, p791–802.
- Garcia-Pichel F, (2009).Cyanobacteria. Arizona State University .Elsevier Inc. p 14.
- Garrity GM., Castenholz RW., Boone DR. (2001).Bergey's manual of systematic bacteriology. Volume 1, The Archaea and the deeply branching and phototrophic Bacteria 2nd edition, p722.

- Gaveriaux J.P. (2018). les cyanobacteries des lichens. Vol.43, p130.
- Ginocchio R., Louis Viollet P. (2009). L'énergie hydraulique, Edition Chantal Arpino, p 637.
- Gudin C. (2013). Histoire naturelle des microalgues.15 Rue soufflot Paris. Edition Odile Jacob, p30.
- Guezennec J. (2004). Les bactéries des sources hydrothermales profondes à l'origine de nouvelles molécules bioactives. *Vertig O la revue électronique en sciences de l'environnement*, Vol. 5, no.3, p386-422.
- Gupta, R.S.; Griffiths, E. (2002). Critical issues in bacterial phylogeny. *Theoretical Population Biology*. 61, p 423–434.
- Gupta V, Ratha S K, Sood A, Chaudhary V, Prasanna R. (2013). New insights into the biodiversity and applications of cyanobacteria (blue-green algae) Prospects and challenges. Indian Agricultural Research Institute, New Delhi 110012, India b Department of Botany, University of Delhi, Delhi 110007(India),p19.
- Guy-franck R. (2021). Modification et réécriture des génomes, édition Ltd 27-27 St George's road London, p206.
- Hai T., Hein S., Steinbuchel A. (2001). Multiple evidence for widespread and general occurrence of type-III PHA synthases in cyanobacteria and molecular characterization of the PHA synthases from two thermophilic cyanobacteria: *Chlorogloeopsis fritschii* PCC 6912 and *Synechococcus* sp. strain MA19. *Microbiology* 147, p 3047–3060.
- Hayashi K., Kanekiyo K., Ohta Y., Lee J.B., Takenaka H., Hayashi T. (2008) .Anti-influenza A virus activity of an acidic polysaccharide from a blue green alga *Nostoc flagelliforme*. *Planta Med*, p74.

- Hjorleifsdottir S., Skirnisdottir S., Hreggvidsson G.O., Holst O., Kristjansson J.K. (2001). Species composition of cultivated and non-cultivated bacteria from short filaments in an Icelandic hot spring at 88°C. *Microbial Ecology*. 42, p 117-125.
- Hobel C.F.V. (2004). Access to biodiversity and new genes from thermophiles by special enrichment methods. Thèse de doctorat. Faculté des Sciences. Reykjavik. Iceland.p83.
- Rad W. (1992). The genus *Thermus*. In Thermophilic bacteria. Kristjansson J.K. (ed). CRC Press.USA, p 228.
- Holmes P.A. (1985). Applications of PHB—a microbially produced biodegradable thermoplastic. *Phys. Technol.* 16, p 32–36.
- Hophins W. G. (2003). *Physiologie végétale*. Edition de Boeck université rue des minimes 39, Bruxelles, p424.
- Joshi H., Shourie A., Singh A. (2020). Cyanobacteria as a source of biofertilizers for sustainable agriculture, Elsevier Inc, p 385.
- Katano T., Nakano S.I., Mitamura O., Yoshida H., Azumi H., Matsuura Y., Tanaka Y., Maezono H., Satoh Y., Satoh T., Sugiyama Y., Watanabe Y., Mimura T., Akagashi Y., Machida H., Drucker V.V., Tikhonova I., Belykh O., Fialkov V.A., Han M.S., Kang S.H., Sugiyama M. (2008). Abundance and pigment type composition of picocyanobacteria in Barguzin Bay, Lake Baikal. *Limnology* DOI: 10.1007/s10201-008-0239, p332.
- Komàrek, J., Kastovsky J. (2003). Coincidences of structural and molecular characters in evolutionary lines of cyanobacteria. *Arch. Hydrobiol. Algolog. Stud.* 109 (Cyanobact. Res4), p305-325.
- Komarek, J.; Komarkova, J.; Kling, H. (2003). Filamentous cyanobacteria. In *Freshwater algae of North America*. Elsevier (ed.), USA, p117-196.

- Kristjansson J.K. (1994). Hjorleifsdottir S., Marteinson V.T., Alfredsson G.A. *Thermus scotoductus*, sp. nov., a pigment-producing thermophilic bacterium from hot tap water in Iceland and including *Thermus sp X-1*. *Systematic and Applied Microbiology*; 17, p 44-50.
- Kristjansson J.K., Stetter K.O. (1992). Thermophilic bacteria. In Thermophilic bacteria. Kristjansson J.K (ed). Boca Raton, FL, USA: CRC Press, In, p 1-18.
- Kulik M.M. (1995). The potential for using cyanobacteria (blue green algae) and algae in the biological control of plant pathogenic bacteria and fungi. *Eur. J. Plant Pathol.* 101, p 585–599.
- Kumar J., Singh D., Madhu B. Kumar A. (2019) .Cyanobacteria: Application in Biotechnology, p 328.
- Kushwaha K., Sain, A., Saraswat P., Agarwal M.K., Saxena J. (2014). Colorful world of microbes: carotenoids and their applications. *Adv. Biol.*, p837-891.
- Lando D. (2011).Algues, filières dufutur Édition Adebitech – Romainville, p 182 – 2011.
- Eben Moussie. (2014).Le monde des microbes. 5-7, rue de l’Ecole polytechnique, 75005 Paris. <http://www.harmattan.fr>, p260.
- Lavoie I., Laurion I., Warren A., Vincent W.F. (2007). Les fleurs d’eau de cyanobactéries, revue de littérature,p 124.
- Lévesque D, Pinel-Alloul B, Hudon C, Giani A. (2017). Impacts des cyanobactéries et des cyanotoxines sur les étangs d'épuration municipaux et les milieux aquatiques récepteurs : Revue de littérature et synthèse, p7.
- Leuschner C., Antranikian G. (1994). Heat-stable enzymes from extremely thermophilic and hyperthermophilic microorganisms. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*; **11**, p95–114.

- Lindbald P. (1999). Cyanobacterial H₂ metabolism: knowledge and potential/strategies for a photobiotechnological production of H₂. *Biotechnol. Appl.* 16, p 141–144.
- Madigan M.T., Martinko J.M., Parker J. (2003) .*Brock Biology of Microorganisms*, 10th ed. Prentice-Hall International, Upper Saddle River, New Jersey, USA.
- Mallick N. (2002). Biotechnological potential of immobilized algae for wastewater N, P and metal removal: a review. *Biometals* 15, p 377–390.
- Miyake M., Erata M., Asada Y. (1996). A thermophilic cyanobacterium, *Synechococcus* sp.MA19, capable of accumulating poly-β -hydroxybutyrate. 82, p 512–514.
- Nagatsu A., Kajitani H., Sakakibara J. (1995). Muscoride A: a new oxazole peptide alkaloid from freshwater cyanobacterium *Nostoc muscorum*. *Tetrahedron Lett.* 36, p 4097–4100.
- Oberhaus L, Birnard J.F., Leboulanger C., Jacquet S., Humbert J.F. (2007). Comparative effects of the quality and quantity of light and temperature on the growth of planktonic *Chlorella* and *P. rubescens*. *Journal of Phycology* 43: p1191-1199.
- Østensvik Ø., Skuberg O.M., Underdak B., Hormazabal V. (1998) .Antibacterial properties of extracts from selected planktonic cyanobacteria—a comparative study of bacterial bioassays. *J. Appl. Microbiol.* 84, p 1117–1124.
- Ouali S. (2008) .Les sources Thermales en Algérie. *Recherche et Développement* ; 13, p 17-18.
- Pandey V.D., Pandey A., Sharma V. (2013). Biotechnological applications of cyanobacterial phycobiliproteins. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci.* 2, p 89–97.
- Pawar S.T., Puranik P.R. (2008) .Screening of terrestrial and freshwater halotolerant cyanobacteria for antifungal activities. *World J. Microbiol. Biotechnol.* 24, p 1019–1025.

- Peña S., Scarone L., Medeiros A., Manta E., Comini M., Serra G. (2012). Synthesis of precursors and macrocycle analogs of aerucyclamides as antitrypanosomal agents. *Med. Chem. Commun.* 3, p 1443–1448.
- Pfaller M.A., Diekema D.J. (2007). Epidemiology of invasive candidiasis: a persistent public health problem. *Clin. Microbiol. Rev.* 20, p 133–163.
- Pinzon-Gamez N.M., Sundaram S., Ju L.K. (2005). Heterocyst differentiation and H₂ production in N₂-fixing cyanobacteria. In: *AIChE Annual Meeting, Conference Proceedings*, Cincinnati, OH, p. 8949–8951.
- Portmann C., Blom J.F., Kaiser M., Brun R., Jüttner F., Gademann K. (2008). Isolation of aerucyclamides C and D and structure revision of microcyclamide 7806A: heterocyclic ribosomal peptides from *Microcystis aeruginosa* PCC 7806 and their antiparasite evaluation. *J. Nat. Prod.* 71, p 1891–1896.
- Prescott L.M., Harley J.P., Klein D.A. (1995). *Microbiologie*, Ed. De Boeck Université p 474, 537.
- Prescott L.M.; Haley, J.P.; Klein, D.A. (2003). *Microbiologie*. De Boeck Université, 2e éd. Française, traduit de la 5e édition américaine (2002). p 45,524.
- Rajneesh, Singh, S. P., Pathak, J., and Sinha, R. P. (2017). Cyanobacterial factories for the production of green energy and value-added products: an integrated approach for economic viability. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 69, p 578–595.
- Rao C.S.V.R. (1994) Antimicrobial activity of cyanobacteria. *Int. J. Mar. Sci.* 23, p 55–56.
- Rastogi R.P., Madamwar D., Incharoensakdi A. (2015). Bloom dynamics of cyanobacteria and their toxins: environmental health impacts and mitigation strategies. *Front. Microbiol.* 6, p 1254.

- Rastogi R.P., Sinha R.P. (2009). Biotechnological and industrial significance of cyanobacterial secondary metabolites. *Biotechnol. Adv.* 27, p 521–539.
- Reviere, B. (2003). *Biologie et phylogénie des algues*. Belin, Paris. Collection Sup Sciences, p255.
- Roque G., Gudin C. (1998). *La vie nous en fait voir de toutes les couleurs*. Edition l'Age d'homme, Lausanne, Suisse, p 204.
- Saïbi H. (2009) .Geothermal resources in Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 13, p 2544–2552.
- Santiago-Santos M.C., Ponce-Noyola T., Olvera-Ramírez R., Ortega López J., Cañizares Villanueva R.O. (2004). Extraction and purification of phycocyanin from *Calothrix* sp. *Process Biochem.* 39, p 2047–2052.
- Schlegel I., Doan N.T., de Chazal, N., Smith, G.D. (1999) .Antibiotic activity of new cyanobacterial isolates from Australia and Asia against green algae and cyanobacteria. *J. Appl. Phycol.* 10, p 471–479.
- Schwartz, J., Shklar, G., Reid, S., Trickler, D. (1988). Prevention of experimental oral cancer by extracts of *Spirulina-Dunaliella* algae. *Nutr. Cancer* 11, p 127–134.
- Sechbach J. (2007). *Algae and cyanobacteria in extreme environments*, edited by the Hebrew university of Jerusalem, p811.
- Serpone N., Dondi D., Albini A. (2007). Inorganic and organic UV filters: their role and efficacy in sunscreens and sun care products. *Inorg. Chim. Acta* 360, p 794–802.
- Singh J.S., Kumar A., Rai A.N., Singh D.P. (2016). Cyanobacteria: a precious bio-resource in agriculture, ecosystem, and environmental sustainability. *Front. Microbiol.* 7, p 529.

- Sonan R.R., Rastogi R.P., Patel R., Madamwar D. (2016). Recent advances in production, purification and applications of phycobiliproteins. *World J. Biol. Chem.* 7, p 100–109.
- Singh R K., Tiwari S P., Rai A-K., Tribhuban M-M. (2011). Cyanobacteria: an emerging source for drug discovery, p 12.
- Sinha R.P., Klisch, M., Helbling E.W., Häder D.P. (2001). Induction of mycosporine like aminoacids (MAAs) in cyanobacteria by solar ultraviolet-B radiation. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* 60, p129-135.
- Sotton B. (2012). Mise en évidence des voies de transfert des cyanotoxines dans les lacs périalpins et implications dans les réponses physiologiques des poissons exposés. Thèse pour obtenir le grade de docteur de l'université de Grenoble, p158.
- Stetter K.O. (1999). Extremophiles and their adaptation to hot environments. *FEBS Letters*, p 452.
- Summerfield T.C., Toepel J., Sherman L.A. (2008). Low-oxygen induction of normally cryptic psbA genes in cyanobacteria; *Biochemistry*. 47, p 12939-41.
- Swain S.S., Paidasetty S.K., Padhy R.N. (2017). Antibacterial, antifungal and antimycobacterial compound from cyanobacteria. *Biomed. Pharmacother.* p90, 760–776.
- Tortora G J., Funke B R. Case C L. (2003). Introduction à la microbiologie. Bibliothèque nationale du Canada. Édition du nouveau pédagogique Inc, p158, 196.
- Uzair B., Tabassum S., Rasheed M., Rehman S.F. (2012). Exploring marine cyanobacteria for lead compounds of pharmaceutical importance. *Sci. World J*, p1–10.
- Vandamme E.J. (1989). Biotechnology of vitamins, pigments of growth factors. *Applied Sciences*. Elsevier Science Publishers, London, p 15–21.

- Vijayakumar S., Manoharan C. (2012). Treatment of dye industry effluent using free and immobilized cyanobacteria. *J. Bioremed. Biodegr.* 3, p 165.
- Vincent W.F., Quesada A. (1993). Cyanobacterial responses to UV radiation: implications for antarctic microbial ecosystems, p. 111-124.
- Visscher P.T., Stolz J.F. (2005). Microbial mats as bioreactors: populations, processes, and products. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 219, p 87–100.
- Whitton B A., Potts M. (1984). The ecology of cyanobacteria their diversity in time and space. Edited by BRIANA WHITTON University of Durham. (England), p304.
- Wim Vermaas F.J. (2001). Photosynthesis and Respiration in Cyanobacteria. Arizona State University USA., p124.
- Wu G.F., Wu Q.Y., Shen Z.Y. (2001). Accumulation of poly- β -hydroxybutyrate in cyanobacterium *Synechocystis* sp PCC6803. *Bioresour. Technol.* 76, p 85–90.
- Yoshizawa S., Matsushima R., Watanabe M.F., Harada K. I., Ichihara A., Carmichael W.W. (1990). Inhibition of protein phosphatases by microcystin and nodularin associated with hepatotoxicity. *J. Cancer Res. Clin. Oncol.* 116, p 609–614.