

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



Université Abbés Laghrour Khenchela
Domaine : Sciences de la nature et la vie
Filière : Biologie moléculaire et cellulaire



Spécialité : Microbiologie appliquée

Mémoire de fin d'étude
Pour l'obtention de diplôme de Master (L.M.D)

Thème :

Les toxines des algues microscopiques
et des cyanobactéries.

Présenté par :

Atallah Dounia
Adjeroudi Khouloud
Kadeche Rima

Devant le jury :

Présidente : Maayouf Nozha	MCB	Université de Khenchela
Encadrante : Boutarfa Soumia	MAA	Université de Khenchela
Examinatrice : Mellal Hanane	MAB	Université de Khenchela

Année 2021/2022

REMERCIEMENTS

Nous commençons par remercier Dieu, le tout-puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience pour accomplir cette tâche simple.

Nous exprimons notre profonde gratitude à tous ceux qui nous ont aidés à élaborer notre thèse, qu'ils soient proches ou éloignés. Nous tenons à remercier en particulier les personnes suivantes :

*Notre encadrante **Dr Boutarfa Soumia**, pour nous avoir honoré par la direction et le suivi de notre mémoire jusqu'aux derniers moments.*

*Nos remerciements vont aux membres du jury **Mellal Hanane** et **M^{me} Maayouf Nozha** qui m'ont fait l'honneur de juger notre travail.*

On remercie vivement, les collègues microbiologistes de notre promo de nous avoir aidé à l'élaboration de la partie théorique.

Nous voudrions exprimer notre profonde gratitude à tous les professeurs qui, par leurs conseils et leurs efforts au fil des ans, nous ont aidés à en arriver là; nous sommes très reconnaissants de la qualité de l'éducation qui nous a été dispensée.

Nous tenons aujourd'hui à vous exprimer notre profonde gratitude et notre grande estime.



DEDICACES

A Allah, qui m'a guidé dans le bon chemin et m'a donné la volonté et la force.

*A mes chères parents, mon père **Atallah Laabidi** et ma mère **Souka Fatima**; les deux personnes qui ont toujours été à côté de moi, m'encourager et me protéger pour atteindre mon but.*

Je vous remercie pour tous vos efforts que vous avez consentis pour mon éducation et mon avenir et la confiance que vous me portez depuis toujours.

J'espère être à la hauteur pour rendre un peu soit-il de ce que m'avez donné.

*A mon adorable sœur **Mouna** et mon cher frère **Abd elhalim**, merci pour être là.*

Que Dieu vous protège, vous préserve du mal et vous comble de bonheur et santé.

*J'espère que vous êtes fiers de moi, chers **grands-parents**.*

Et je tiens à remercier tous les membres de ma famille, qu'ils soient jeunes ou moins jeunes, pour leur soutien tout au long de ma carrière universitaire.

*A mes chères amies **Lina, Ahlem, Nassira, Afaf, Imene, Chaima** pour leur amour et amitié et spécialement qui ont toujours me donner la force et le courage pour continuer. Que dieu nous garder toujours unis.*

*A mes collègues **Kadeche Rima** et **Adjroudi Khouloud**, vous êtes les meilleurs binômes*

Votre confiance, compréhension et collaboration m'ont aidé beaucoup pour faire ce travail.

C'est une bonne chance de travailler avec vous, notre collaboration reste toujours exceptionnelle à mes yeux. Je vous espère un avenir plein de succès et bonheur.

.....Je dédie ce travail.

DOUNIA.





DEDICACES

Tout d'abord, je remercie Dieu de m'avoir donné la force et le courage d'accomplir cette tâche,

Ma mère (**derrardja djazia**) était une belle et merveilleuse femme qui attendait que je voie la lumière avec amour et a pris toutes les difficultés pour moi. Que Dieu vous bénisse, ma chère, pour vivre au paradis.

À ma chère famille, la famille derrardja :

Mon grand père et ma grande mère (**tayeb et Zakia**) Les mots de louange ne vous donnent pas votre droit, sans vos efforts et votre bonne éducation, le succès n'aurait pas eu accès, merci pour tous vos dons.

Mounia : À la précieuse qui m'a élevé quand j'étais enfant et qui m'a enseigné et entouré de sa tendresse, que je trouve toujours à côté de moi dans ma crise, avec tout l'amour je lui donne un mot de remerciement

Meriem et Hakima : Avec vous, j'ai vu les couleurs de la vie, Il y a toujours des cœurs créés pour nous rendre heureux et nous dire que la vie est toujours belle.

Que puis-je dire du merveilleux et grand personnage Au bon cœur, que Dieu vous bénisse, mon cher père **Abdelkrim**

Mes oncles qui sont mes frères : **Lotfi, Idris, lazher, Youcef, Mahmoud** : Parce que vous avez rendu ma vie meilleure, et vous ne m'avez pas laissée seule. Je suis fier de vous.

À ma sœur, à qui ma mère n'a pas donné naissance, mais elle fait partie de ma vie : **Fatma**

À mes petits enfants qui m'appellent maman : **Ranim, Yazen, Chahd, Safia**

À mes petites sœurs : **Salma, sirine et marwa**

À ma belle amie : **Hayat timizer**

À mes chères amies : **Radhia, Dounia, Rima**

Aux femmes de mes oncles, aux maris de ma tante et à tous leurs enfants.

À tous ceux qui m'ont appris une lettre dans ce monde.

KHOULOUD.





DEDICACES

Avant tout, Je remercie Dieu de m'avoir accordé la patience, la force et la conscience pour bien refaire cette humble tâche que je me suis assignée;

Mon cher père Djamel, pour ses constantes encouragements et son soutien moral durant les moments difficiles qui sont les meilleurs gages de réussite, qu'il trouve dans cet ouvrage la preuve modeste d'une infinie reconnaissance et d'un profond amour mon adorable mère Akila, qui est toujours présent à côté de moi, merci mam pour tes sacrifices afin que tes enfants grandissent et prospèrent, que Dieu te protège

Mes charmantes sœurs Kahina, Wassila (rabi yrhimha), Hanan, Hayat. Pour leur soutien affectif et leurs encouragements constants tout au long de notre travail.

A mes chers frères Abdallah et Mohammed. Pour leur gentillesse et confiance.

A tous mes amis Khawla, Lina, Ahlem, Nassira, Dounia, Khouloud, Dalel, Maroua, khawla, djihan, hassiba ...

A tous ceux que j'aime

Aucune dédicace, Aucun mot ne pourrait exprimer réellement ta juste valeur. Chaque ligne de cette mémoire, Chaque mot et chaque lettre t'exprime la reconnaissance et le soutien de ma Docteur Kadri Ibrahim

RIMA.



Résumé

Le phytoplancton (plancton végétal) est constitué essentiellement d'algues microscopiques et des cyanobactéries. Ces derniers sont des microorganismes photosynthétiques oxygéniques avec une variation dans les caractéristiques morphologiques, le mode nutritionnelle, la reproduction, l'organisation cellulaire, la structure des plastes et l'habitat. Les algues microscopiques y compris les cyanobacteries occupent la plupart des habitats. Ces microorganismes photosynthétiques sont connus pour produire une large gamme de métabolites secondaires ayant une d'importance biotechnologique, biomédicale et industrielle. Certaines espèces de cyanobacteries produisent également des toxines appelées cyanotoxines. Parmi les milliers d'espèces d'algues microscopiques, une trentaine produit des substances toxiques pour l'homme, nommés phycotoxines. La propagation à l'homme se fait via la consommation de produits de la pêche (coquillages, poissons). La prévalence d'espèces productrices de toxines est irrégulière et liée à des variables environnementales reste non définies. Notre étude consiste à étudier connaître les principales communautés d'algues microscopiques y compris les cyanobactéries et leurs toxines.

Mots clés : Algues microscopiques, biodiversité, cyanobactéries, cyanotoxines, phycotoxines,

ملخص

العوالق النباتية (العوالق النباتية) تتكون بشكل رئيسي من الطحالب المجهرية والبكتيريا الزرقاء. هذه الأخيرة هي كائنات دقيقة أوكسجينية ضوئية ذات اختلاف في الخصائص المورفولوجية والوضع الغذائي والتكاثر وتنظيم الخلايا و البنية البلاستيكية والموئل. تحتل الطحالب المجهرية بما في ذلك البكتيريا الزرقاء معظم الموائل. من المعروف أن هذه الكائنات الدقيقة الضوئية تنتج مجموعة واسعة من المستقبلات الثانوية للتكنولوجيا الحيوية والأهمية الطبية الحيوية والصناعية. تنتج بعض أنواع البكتيريا الزرقاء أيضًا سمومًا تسمى السموم الزرقاء. من بين آلاف أنواع الطحالب المجهرية، ينتج حوالي 30 نوعًا مواد سامة للإنسان، تسمى السموم الطحلبية. ينتشر إلى البشر من خلال استهلاك منتجات مصائد الأسماك (المحار والأسماك). انتشار الأنواع المنتجة للسموم غير منتظم ولا يزال مرتبطًا بالمتغيرات البيئية الغير محددة. تتكون دراستنا من دراسة لمعرفة المجتمعات الرئيسية للطحالب المجهرية بما في ذلك البكتيريا الزرقاء وسمومها.

الكلمات الرئيسية: الطحالب المجهرية، التنوع البيولوجي، البكتيريا الزرقاء، السموم الزرقاء، السموم الطحلبية،

Abstract

Phytoplankton (plant plankton) consists mainly of microscopic algae and cyanobacteria. The latter are oxygenic photosynthetic microorganisms with a variation in morphological characteristics, nutritional mode, reproduction, cell organization, plaster structure and habitat. Microscopic algae including cyanobacteria occupy most habitats. These photosynthetic microorganisms are known to produce a wide range of secondary metabolites of biotechnology, biomedical and industrial importance. Some species of cyanobacteria also produce toxins called cyanotoxins. Of the thousands of microscopic algae species, some 30 produce substances toxic to humans, called phycotoxins. The spread to humans is through the consumption of fishery products (shellfish, fish). The prevalence of toxin-producing species is irregular and related to environmental variables remain undefined. Our study consists in studying to know the main communities of microscopic algae including cyanobacteria and their toxins.

Keywords: Microscopic algae, biodiversity, cyanobacteria, cyanotoxins, phycotoxins,

Table des matières

Résumés	
Liste des figures	I
Liste des tableaux	II
Liste des abréviations	IV
Introduction	1
Chapitre I : Généralité sur les algues microscopiques et des cyanobactéries	
1. Les algues microscopiques	4
2. Caractéristiques morphologiques et physiologiques	4
3. Mode nutritionnelle	6
3.1. Mode autotrophe	6
3.2. Mode hétérotrophe	7
3.3. Mode mixotrophe	7
4. Reproduction	8
5. La classification des algues microscopiques	9
5.1. Les procaryotes	10
5.1.1. Cyanophytes ou cyanobactéries	10
5.1.1.1. Diversité morphologique	11
5.1.1.2. Multiplication	12
5.1.1.3. Ecologie	13
5.1.1.4. Taxinomie	13
5.2. Les eucaryotes	14
5.2.1. Chlorophytes	15
5.2.2. Euglenophytes	15
5.2.3. Chrysophytes	16
5.2.4. Pyrrophytes	16
5.2.5. Phaeophytes	17
5.2.6. Rhodophytes	17
6. Domaines d'application des algues microscopiques	18
6.1. Domaines alimentaires	18
6.2. Domaines pharmaceutiques	20
6.3. Domaines énergétiques	20
6.3.1. Le biodiesel	21

6.3.2. Le bioéthanol	22
6.3.3. Production d'électricité	22
6.3.4. Les bio-huiles	23
Chapitre II : Les toxines des algues microscopiques et des cyanobactéries	
I. Les toxines	25
II. Classification des phycotoxines	25
II.1. Les cyanotoxines	26
1.1. Les hépatotoxines	26
1.1.1. Les microcystines et les nodularines	26
1.1.2. La cylindrospermopsine et ses analogues	27
1.2. Les neurotoxines	28
1.2.1. Les anatoxines	28
1.2.2. Les saxitoxines	29
1.2.3. La B-N-méthylamino-L-alanine ou BMAA	30
1.3. Les dermatoxines	31
1.4. Les lipopolisaccharides	31
II.2. Les biotoxines marines	32
2.1. Classification selon les propriétés chimiques	32
2.1.1. Les phycotoxines hydrosolubles	32
2.1.1.1. Les phycotoxines paralytiques (PSP)	32
2.1.1.2. Les phycotoxines amnésiques (ASP)	34
2.1.2. Les phycotoxines lipophiliques	35
2.1.2.1. Les phycotoxines diarrhéiques (DSP)	36
a. L'acide okadaïque (OA) et les dinophysitoxines (DTXs)	36
b. Les pectenotoxines	38
c. Les yessotoxines (YTXs)	39
2.1.2.2. Les toxines à cycle imine	40
a. Les azasperacides (AZAs)	40
III. Les méthodes de détection des phycotoxines	41
Conclusion	43
Références bibliographiques	44

Liste des figures

Figure n°	Titre	Page n°
01	Diversité morphologique des algues microscopiques	5
02	Phases luminescentes et brumeuses de la réaction photosynthétique	6
03	Mode reproductif chez les algues microscopiques	8
04	Diversité des cycles de reproduction des algues	9
05	A : Exemple de cyanobactérie unicellulaire coloniale. <i>Woronichinia naegelania</i> , B : Exemple de cyanobactérie organisée en trichomes : <i>Aphanizomenon flos aquae</i> , C : Exemple de cyanobactérie organisée en filament : gaine visible à l'extrémité. Genre <i>Phormidium</i>	11
06	Trichome de cyanobactérie (<i>Anabaena smithii</i>) présentant un hétérocyste (H) et un akinète (A) bien distincts	12
07	Schéma d'une structure d'algue microscopique unicellulaire	15
08	<i>Ectocarpus sp</i>	17
09	Cellules de <i>chlorella vulgaris</i> observées au microscope optique	19
10	Diagramme représentant les processus de conversion de biomasse microalgale pour la fabrication de biocarburant	21
11	Formation de biodiesel à partir de la transestérification d'une molécule de triacylglycérol (TAG) dérivée du méthanol	22
12	Structure des microcystines (A) et des nodularines (B). X et Z sont des acides aminés variables, R=H ou CH ₃	27
13	Structure de la cylindrospermopsine	28
14	Structure des anatoxines : (A) Anatoxine-a, (B) Homoanatoxine-a et (C) Anatoxine-a(s)	29
15	Structure de la saxitoxine, une cause d'intoxication paralytique par les mollusques. Sa structure est représentative des toxines de ce groupe	30
16	Structure de la β-N-méthylamino-L- alanine	31
17	Structures des toxines à effets irritants : (A) lyngbyatoxine A, (B) debromoaplysiatoxine et (C) aplysiatoxine	31
18	Structure de base de la saxitoxine et de ses dérivés	33
19	Structure de l'acide domoïque et de ses isomères	35
20	Structures de base de l'acide okadaïque et dinophysistoxine-1, qui produisent des intoxications diarrhéiques dans les coquillages	38
21	Structure chimique des pecténotoxines	39
22	Structure chimique de base des yessotoxines	40

23	La structure de l'azaspiracide	41
----	--------------------------------	----

Liste des tableaux

Tab n°	Titre	Page n°
01	Les différents types nutritionnels des microalgues	8
02	Diversité des microalgues eucaryotes et procaryotes	10
03	Systematiques des Cyanophycées	14
04	Systematiques des Euglenophycées	16

Liste des abréviations

- AA** : Acide arachidonique
- AGPI**: Acides gras polyinsaturés
- AO**: Acide okadaïque
- ASP**: Amnesic Shellfish Poisoning
- ATP** : Adenosine triphosphate
- AZA** : Azaspiracides
- AZP** : Azaspiracid poisoning
- BMAA** : La β -N-méthylamino-L-alanine
- CFP**: Ciguatera fish poisoning
- Da** : Le dalton ou unité de masse atomique unifié
- DHA**: Acide docosahexaénoïque
- DL50** : concentration létale 50
- DSP**: Diarrheic Shellfish Poison
- DTX**: Dinophysistoxines
- EMAG** : Esters d'acides gras
- EPA**: Acide eicosapentaénoïque
- GTX1-GTX4** : gonyautoxins
- HAB**: Harmful Algal Blooms
- HVO** : Hydrogénation d'huiles végétales
- i.p (IP)** : Intraperitoneal injection
- IPFM** : Intoxication paralysante par les fruits de mer
- La ω 3 série** : La n-3 série
- LNA**: Acide α -linoléique
- LPS**: Lipopolysaccharides
- MS**: Biomasse
- NAPDH2** : Nicotinamide adénine dinucléotide phosphate
- n et 2n chromosomes** : Cellule haploïde et cellule diploïde
- NMJ** : Neuromuscular Junction
- NSP**: Neurotoxic Shellfish Poisoning
- PKa** : est un nombre qui indique à quel point un acide est faible ou fort
- PSP**: Paralytic Shellfish Poisoning

PTX: Pecténotoxines

Récepteur ACh : L'acétylcholine

STX : Saxitoxine

TAG : Triacylglycérol

UE : L'Union européenne

YTX : Yessotoxines

Introduction

Introduction

La plupart des organismes qui occupent les habitats aquatiques, les mers, les royaumes (**Barnes et Mann, 2009**), sont des organismes microscopiques, parmi lesquels des organismes photosynthétiques (**Van der Valk, 2012**), y compris des algues microscopiques et des cyanobactéries (**Vu et al., 2018**). Ces micro-organismes photosynthétiques présentent des caractéristiques morphologies différentes, avec différent couleur et de formes de vie, dont beaucoup vivent de préférence en nageant dans l'eau et sont transportés par les courants constituent le phytoplancton et d'autres vivent sur ou très près du fond (**Patel et al., 2019 ; Molina-Grima et al., 2021**).

Ces micro-organismes photosynthétiques sont de grande importance car ils constituent la base de tout écosystème aquatique et produisent environ la moitié de l'oxygène de notre planète (**Mollo et Noury, 2013**). Les algues microscopiques et les cyanobactéries se reproduisent selon des facteurs environnementaux tels que les saisons de l'année et la disponibilité de nutriments (**Agrawal, 2012**). Généralement et en réponse à certaines conditions environnementales ils se reproduisent très rapidement de sorte que leurs populations atteignent des valeurs supérieures à celles considérées comme normales ce qu'il affectent négativement l'écosystème aquatique (**Khan et al., 2018**), seulement environ 300 espèces parmi les plusieurs milliers de microalgues produisent ces événements nuisibles (**Visciano et al., 2016**).

Les cellules algales ont développé des stratégies chimiques pour communiquer, se défendre et s'adapter à leur environnement. Par conséquent, ils sont capables de fabrication une large gamme de métabolites, y compris ceux qui ont des activités biologiques d'intérêt biotechnologique ou autres métabolites qui sont potentiellement toxiques appelés toxines (**Orejuela-Escobar et al., 2021**).

Les toxines microalgales sont des métabolites secondaires qui contiennent une variété de composés avec divers structures chimiques et dont l'action dépend de différents mécanismes de toxicité. Par conséquent, Les efflorescences algales nuisibles peuvent avoir des impacts néfastes sur les organismes marins (mortalité, troubles de la reproduction) ou sur la santé humaine, par exposition directe à des toxines ou résultant

de la bioaccumulation de toxines algales dans les fruits de mer (**Landsberg, 2002**).

Chez l'homme, elle peut entraîner plusieurs problèmes gastro-intestinaux ou neurologiques, se référant principalement aux principaux syndromes caractérisés : intoxication paralytique aux mollusques – PSP, intoxication amnésique aux mollusques – ASP, intoxication diarrhéique aux mollusques – DSP. Les poissons, les oiseaux et les mammifères marins peuvent tous être endommagés par les toxines à base d'algues qui s'accumulent le long de la chaîne alimentaire jusqu'à ce qu'elles atteignent leurs proies (**Caruana et Amzil, 2018**).

Notre étude consiste à étudier connaître les principales communautés d'algues microscopiques y compris les cyanobactéries et leurs toxines.

A cet égard ce mémoire est divisé en deux grands volets ou chapitres :

- Le premier chapitre, une étude bibliographique qui donne un aperçu général sur les algues microscopiques et les cyanobactéries.
- Le deuxième chapitre, une étude bibliographique présente une présentation des toxines des algues microscopiques et des cyanobactéries.

Chapitre I

Généralité sur les algues
microscopiques et des
cyanobactéries

1. Les algues microscopiques

Les algues microscopiques sont des micro-organismes photosynthétiques dont les dimensions vont de quelques micromètres à quelques dizaines de micromètres (Cadoret et Bernard, 2008) et sont classés soit en eucaryotes (algues vertes, rouges ou brunes) soit en procaryotes (cyanobactéries) (Faller, 2011). Ils peuvent être unicellulaires ou multicellulaires (Sialve et Steyer, 2013).

Ces micro-organismes sont considérées comme thallophytes, ce qui signifie qu'ils sont dépourvus de vaisseaux tige, racine et conducteur (Lee, 2008). Ils possèdent des pigments chlorophylliens qui leur fournissent l'énergie dont ils ont besoin pour survivre (Vale et al., 2020); ils ont également besoin de lumière, de dioxyde de carbone (CO₂) et d'eau pour réaliser des réactions photosynthétiques (Hosikian et al., 2010).

On les trouve dans les océans, les eaux douces, les mers, saumâtre ou saline, mais certaines sont terrestres et peuvent pousser au sol ou sur des troncs d'arbres (Chlorophyte, *Pleurococcus*), ou sur un sol humide (Cyanobactérie, *Nostoc*) (Cavalla, 2000), et il existe un large éventail d'espèces (estimé entre 50 000 et 1 million pour les 30 000 espèces étudiées). (Dejoye, 2013). La majorité des algues microscopiques se rassemblent à une température de 25-35°C et un pH de zéro (Lucchitti, 2014).

2. Caractéristiques morphologiques et physiologiques

Les algues microscopiques sont les organismes vivants les plus anciens du règne végétal (Steffoff, 2006), puisqu'elles existent depuis plus de trois milliards d'années et se retrouvent dans tous les milieux aquatiques, y compris les dispositifs végétatifs rudimentaires (manque de structures spécialisées). Ils sont connus sous le nom de thalle (Barberousse, 2006).

Les microalgues ont une taille micrométrique (Ben Amor, 2015) et se présentent sous différentes formes : *Chlamydomonas* gouttelette, *Porphyridium* sphérique, *Arthrospira* spirale, et même étoile (*Staurastrum*) (Tebbani et al., 2014) (Fig.1).

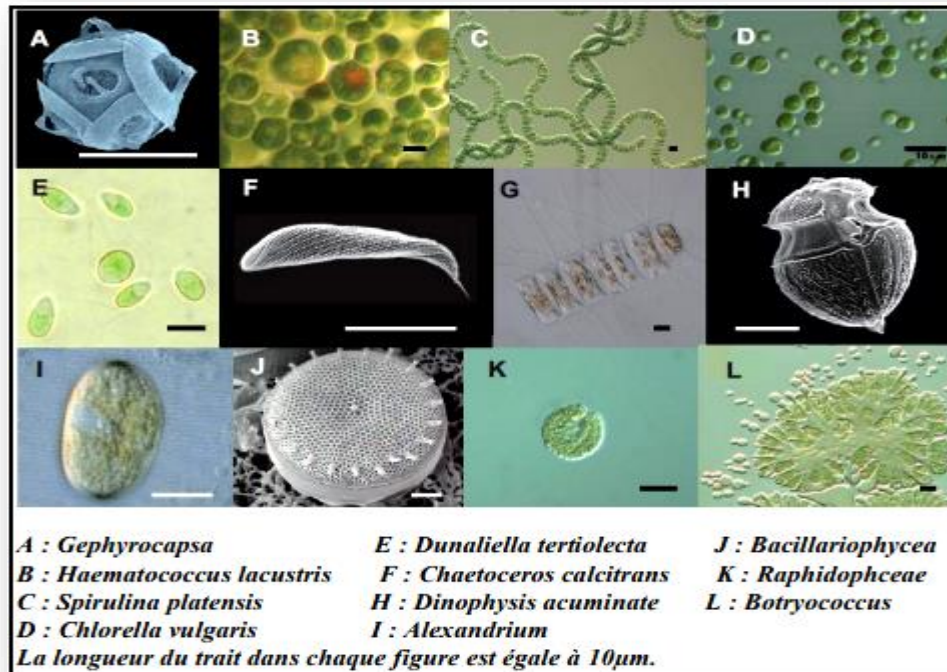


Figure 01 : Diversité morphologique des algues microscopiques (Filali, 2012).

D'un point de vue structurel, les algues microscopiques possèdent un noyau et une membrane plasmique qui contient des organites vitaux tels que les mitochondries, les oléoplastes, les amyloplastes et les chloroplastes (Filali, 2012). Les chlorophylles, les caroténoïdes et les phycobiliprotéines sont les trois principaux types de pigments qu'on y trouve (Asfour, 2019).

Les microalgues, comme tous les autres organismes à chloroplastes, sont responsables de convertir l'énergie solaire en énergie chimique pour leur croissance, ce que l'on appelle la photosynthèse (Roger et François, 2004).

Le processus photosynthétique est divisé en deux étapes : photochimique et non photochimique. Ce processus se produit dans les chloroplastes, qui sont des organites liés à la photosynthèse présents dans le cytoplasme des eucaryotes (Didur, 2014) (Fig.2).

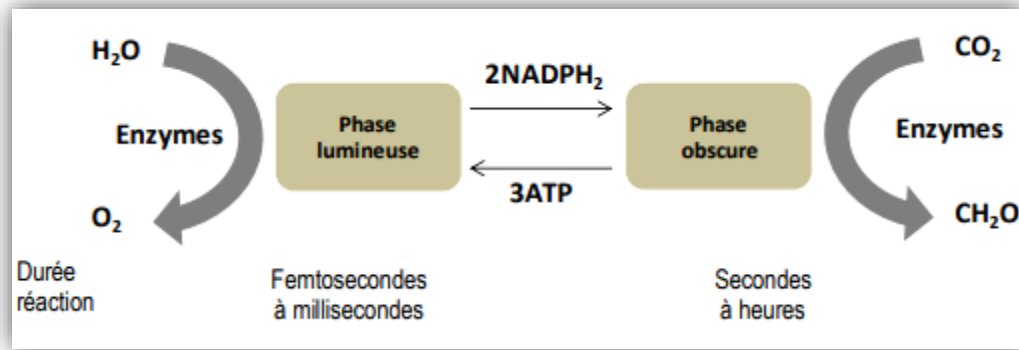


Figure 2 : Phases lumineuses et brumeuses de la réaction photosynthétique (Sialve et Steyer, 2013).

- **Phase lumineuse**

Ce bref processus se déroule dans la membrane chloroplastique. Elle permet la transformation de l'énergie solaire en énergie chimique pour la production de $NADPH_2$ et d' ATP . La rupture de la molécule d'eau consommée libère de l'oxygène. C'est une réponse particulièrement rapide (Sialve et Steyer, 2013).

- **Phase " d'obscurité" ou "sombre"**

La réaction aura lieu dans le stroma (Fig.2), où les métabolites de la phase propre contribuent à la conversion du CO_2 dans les glucides. Cette étape est nettement plus lente que la précédente. (Sialve et Steyer, 2013).

3. Mode nutritionnelle

3.1. Mode autotrophe

Sont des organismes photosynthétiques qui prospèrent dans des environnements très humides et qui conviennent de transformer l'énergie solaire et le carbone inorganique (CO_2) en une gamme de produits organiques (Krichen, 2020). Ils peuvent également effectuer des réactions photosynthétiques leur permettant de se nourrir indépendamment de la lumière, l'eau et les minéraux (Moejes et Moejes, 2017). Ainsi, la photosynthèse est la transformation de l'énergie photonique en énergie chimique (Masojídek *et al.*, 2013).

Les chloroplastes, qui sont les organites qui produisent le mécanisme

photosynthétiques, se trouvent dans les cellules solaire .Ils peuvent également utiliser l'eau comme source d'électrons pour réaliser un processus de production d'oxygène photonique (Voloshin *et al.*, 2015).C'est le cas des cyanobactéries, le plus ancien organisme lumineux connu (Reynaud et Roger, 1981). Pendant la nuit, les algues microscopiques respirent et utilisent une partie de leurs réserves pour fournir de l'oxygène au CO₂ (Buehner *et al.*, 2016).

3.2. Mode hétérotrophe

Le mode hétérotrophe dépend d'organismes qui peuvent agir sans lumière en utilisant l'énergie chimique et le carbone obtenus à partir d'autres matières organiques pour prospérer. (Chojnacka et Marquez-Rocha, 2004).

En ce sens, l'incorporation de carbone dans les cellules est plus dépensée sur le plan énergétique, ce qui conduit à une réduction de la taux de croissance.Le glucose et l'acétate sont les substrats organiques "simples" privilégiés, bien plus attractifs économiquement (Asfour, 2019), De nombreuses espèces différentes produisent des lipides et d'autres composés souhaités (Novoveská *et al.*, 2016).La production a lieu dans des bioréacteurs fermés qui s'apparentent à des fermenteurs. En ce qui concerne la fabrication de biocarburants, des niveaux de production plus élevés semblent prometteurs (Doré-Deschênes, 2009).

3.3. Mode mixotrophe

Le mode trophique des organismes vivants est-il capable de l'un de deux types : soit tous les membres d'une espèce peuvent se développer à la fois en hétérotrophie et en autotrophie, soit une partie se développe en hétérotrophie tandis que l'autre se développe en autotrophie (Latil de Ros, 2017).Le taux de croissance spécifique global sera plus ou moins égal à la moyenne des taux de croissance atteints aux deux niveaux trophiques (Sialve et Steyer, 2013).

Ils peuvent produire du glucose à base de dioxyde de carbone et d'eau en présence de lumière, ainsi qu'assimiler directement le carbone organique en l'absence de lumière (Velea *et al.*, 2017). Certaines espèces de microalgues mixotrophes sont qualifiées de facultatives photoautotrophes, Parce qu'elles peuvent utiliser le CO₂ comme source de carbone et la lumière comme source d'énergie (Boileau, 2015).

Le tableau 1 décrit les nombreuses catégories nutritionnelles de microalgues.

Tableau 1 : Les différents types nutritionnels des microalgues (Asfour, 2019)

Mode de nutrition	Source d'énergie	Source de carbone
Photo-autotrophe	Radiation solaire	CO ₂ seulement
Photo-hétérotrophe	Radiation solaire	CO ₂ et COCO ₂
Chemo-autotrophe	Composé inorganique	CO ₂
Chemo-hétérotrophe	Composé organique	Carbone organique

4. Reproduction

Dans plusieurs cas, la reproduction d'algues microscopiques se fait par multiplication végétative. Il s'agit d'une multiplication asexuée qui implique soit la division d'une seule cellule (comme dans le cas des algues bleues) soit la fragmentation du thalle, entraînant le développement de plusieurs organismes identiques (Mezdour, 2018). Elle est fréquemment accomplie par la création de cellules spécialisées appelées spores. Les eucaryotes ont également une reproduction sexuée, dans laquelle l'union de deux cellules reproductrices, ou gamètes, produit un œuf, ou zygote (Laplace-Treytore *et al.*, 2014).

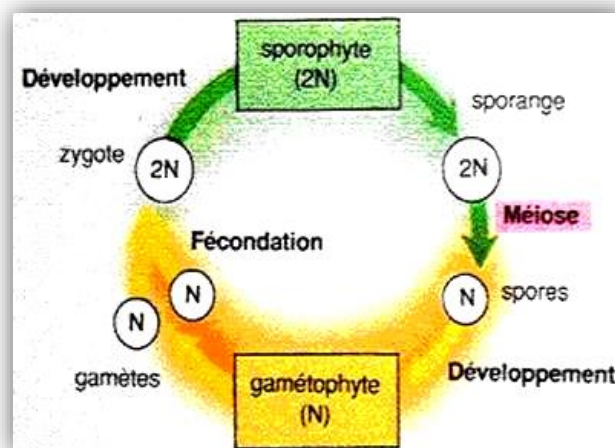


Figure 3 : Mode reproductif chez les algues microscopiques (König, 2018).

La reproduction d'algues microscopiques se fait ainsi, avec une alternance de reproduction asexuée assurée par les thalles (sporophytes) et de reproduction sexuée assurée par les thalles producteurs de gamètes (gamétophytes) (Oucif, 2018) (Fig.3).

Une alternance de phases (de n à $2n$ chromosomes) se superpose aux cycles générationnels plus ou moins variables qui caractérisent leur reproduction (Zitouni, 2015) (Fig.4).

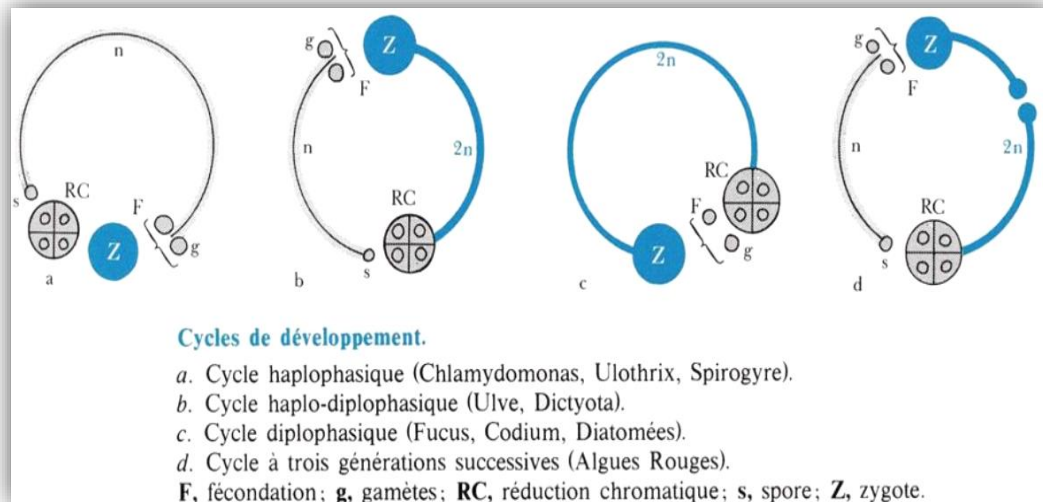


Figure 4 : Diversité des cycles de reproduction des algues (Ousif, 2018)

5. La classification des algues microscopique

Les algues microscopiques sont extrêmement diverses, avec estimé 30 000 espèces actuellement identifiées. Ce nombre montre moins de 10% du nombre total d'espèces révélées (Djoye, 2013). Ils sont classés morphologiquement, par la nature chimique de leurs produits photosynthétiques (Produit d'accumulation intracellulaire), par la nature de leur cycle de vie, ou leur pigmentation ou par l'organisation de leurs membranes photosynthétiques (Kamyab *et al.*, 2019).

Il existe plusieurs classifications taxonomiques pour les microalgues (Tab.2), mais elles peuvent être divisées en sept branches dont les plus importantes sont les cyanophytes, chrysophytes, rhodophytes, euglenophytes, chlorophytes, pyrrophytes et phaeophytes (Bouchentouf et Abdarrahmane, 2021).

Tableau 2: Diversité des microalgues eucaryotes et procaryotes (Sialve et Steyer, 2013).

Règne	Embranchement/Classe
Procaryotes	Cyanophytes
	Prochlorophytes
Eucaryotes	Bacillariophytes
	Charophytes
	Chlorophytes
	Chrysophytes
	Cryptophytes
	Dinophytes
	Euglenophytes
	Glaucophytes
	Haptophytes
	Phaeophytes
	Rhodophytes

Globalement, il existe deux sortes des algues microscopiques:

5.1. Les procaryotes

Ce sont des organismes unicellulaires qui sont dépourvues de noyau et d'organites cellulaire (nucléoles, mitochondries, appareil de Golgi, plastes, vacuoles, et il y a aussi absence de chromatine comme chez les bactéries) (Blais, 2008).

5.1.1. Cyanophytes ou cyanobactéries

Les cyanobactéries sont des procaryotes photosynthétiques (cellules dépourvues de noyau et d'organites intracellulaires) parfois appelées cyanophytes ou cyanophycées (Stanier et Bazine., 1977). Les cyanobactéries font partie d'un groupe ancien de micro-organismes appelé eubactérie, et une grande partie de leur diversité morphologique a évolué au cours des 2 derniers milliards d'années. Connues aussi sous le nom d'algues bleu-vert ou d'algues bleues (Kulasooriya, 2011), les cyanobactéries sont des bactéries à Gram négatif qui vivent dans une large gamme d'écosystèmes (Quiblier *et al.*, 2020).

La majorité des cyanobactéries, comme les algues, contiennent de la chlorophylle plutôt que de la bactériochlorophylle, présente chez certaines bactéries. (Jérémy, 2005). Ces pigments photosynthétiques se trouvent au niveau des thylacoïdes plutôt que dans les chloroplastes, comme ils le sont dans les systèmes photosynthétiques

eucaryotes .Elles renferment aussi généralement des phycobiliprotéines (pigments accessoires) qui ont la capacité d' effectuer des réactions photosynthétiques .Ces pigments sont responsables de la couleur bleue (phycocyanine, allophycocyanine) ou rouge (phycoérythrine) de certaines espèces de cyanobactéries, selon leur présence et leurs concentrations relatives (**Briand , 2008**).

5.1.1.1. Diversité morphologique

Ces micro-organismes ont une grande variété d'organisation morphologique; cylindriques, Unicellulaires sphériques, ovoïdes ou piriformes, ellipsoïdales, isolées ou agrégées en colonies de formes irrégulières, sphériques, globuleuses, lobées, quadratiques ou planes (**Briand, 2008**).

Elles peuvent être seules (unicellulaires) ou en colonies, ou bien organisées en trichomes (sans gaine) ou en filaments (avec gaine) (**Lavoie et al., 2007**) (**Fig. 5**).

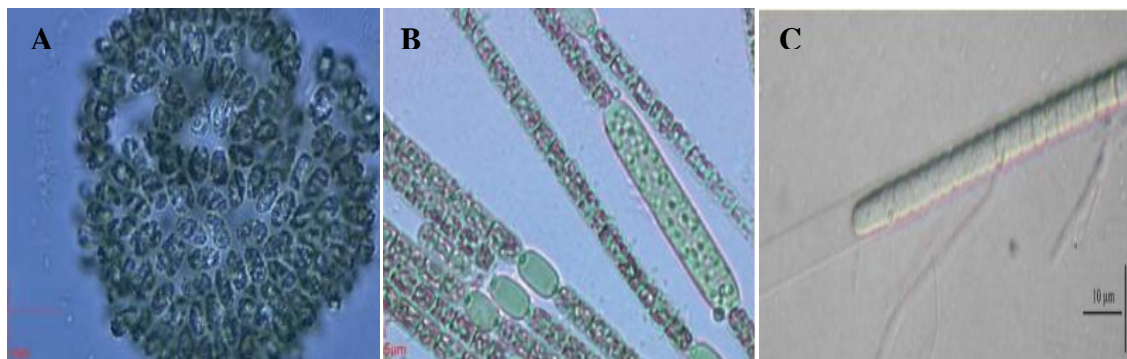


Figure 5 : **A** : Exemple de cyanobactérie unicellulaire coloniale. *Woronichinia naegeliana*, **B** : Exemple de cyanobactérie organisée en trichomes : *Aphanizomenon flos aquae*, **C** : Exemple de cyanobactérie organisée en filament : gaine visible à l'extrémité. Genre *Phormidium* (**Levi et al., 2006**).

Par ailleurs, les cyanobactéries sont capables de distinguer trois catégories de cellulaires:

- les cellules végétatives à teneur homogène en cellulaire pouvant contenir des granules ou, dans le cas de certaines espèces planctoniques, des vésicules gazeuses (**Allen, 1984**).

- Les hétérocystes ne se trouvent que sous des formes filamenteuses particulières et seulement lorsque les conditions environnementales pour leur production sont réunies (Ogawa.Carr, 1969).
- Les akinètes ne se trouvent que dans des formations filamenteuses particulières, et ils peuvent se trouver seuls ou en groupe dans le trichome, dans une localisation intercalaire ou subterminale, proche ou éloignée des hétérocystes (Vidal *et al.*, 2021) (Fig. 6).

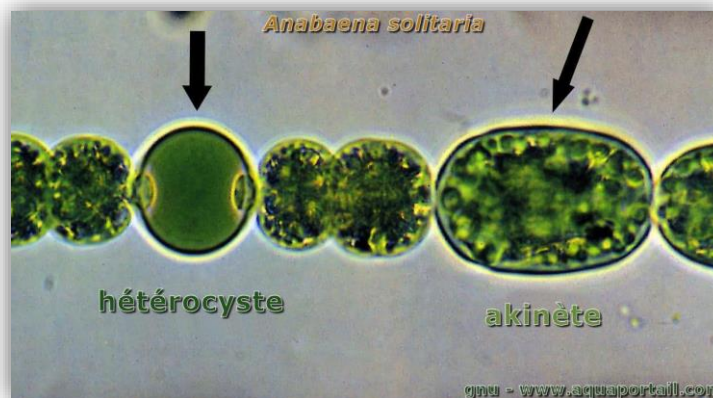


Figure 6 : Trichome de cyanobactérie (*Anabaena smithii*) présentant un hétérocyste (H) et un akinète (A) bien distincts (Vonarx, 2008)

5.1.1.2. Multiplication

La multiplication des cyanobactéries est végétative, c'est -à -dire non sexuée, et se produit par division binaire d'une cellule mère en deux cellules filles, bourgeonnantes ou nombreuses divisions. Le temps nécessaire pour que les populations doublent varie selon les espèces et les conditions environnementales. Cela peut prendre de quelques heures à plusieurs jours (Agouni, 2012).

Au sein de la cellule maternelle, les unicellulaires peuvent produire des baeocytes (minicellules). Les individus de la colonie se multiplient également en raison de la fragmentation (Levi *et al.*, 2006). En conséquence, les formes filamenteuses produisent des hormogonies (minifilaments mobiles) qui participent à la colonisation après le détachement du filament (Damerval *et al.*, 1989).

Les endospores sont des spores qui prennent naissance à l'intérieur d'une cellule végétative dont le cytoplasme est divisé et dont la paroi devient l'enveloppe du

sporocyste .Les exospores, qui sont formées par une série de divisions transversales, peuvent soit devenir des spores, soit resté attachées au chapelet (**Feldmann et L'Hardy-Halos, 1977**).Les spores de résistance sont les akinètes (**Blin, 2009**).

Il n'y a pas de reproduction sexuée, bien qu'il y ait une parasexualité, comme dans les autres eubactéries (**Legrand, 2017**).

Outre les nombreux mécanismes de multiplication décrits, les cyanobactéries ont deux modes de transfert de matériel génétique : la transformation et la conjugaison (**Frémy et Lassus, 2001**).

5.1.1.3. Ecologie

Les cyanobactéries sont présentes sur Terre depuis au moins trois milliards d'années, et grâce à leur remarquable capacité d'adaptation, elles ont colonisé presque tous les types de milieux (**Bertrand et al., 2004**), qu'ils soient aquatiques ou terrestres, et dans des conditions très diverses : les salins (halophiles), chaud (thermophiles), froid (cryophiles) (**Seckbach, 2007**). Occasionnellement, des cyanobactéries coexistent avec des organismes animaux ou végétaux (**Suty, 2015**).

Les cyanobactéries sont des photoautotrophes, ce qui signifie qu'elles tirent leur énergie lumineuse du soleil à travers les processus photosynthétiques. Ainsi , la lumière est l'un des facteurs les plus importants de leur développement et de leur diffusion (**Doré-Deschênes, 2009**). Leur mode de vie peut être planctonique ou pélagique (vivant dans la masse d' eau et se laissant transporter par ses mouvements) ou benthique (fixé à des substrats immergés) dans des eaux courantes ou stagnantes (**Lavoie et al., 2007**).

5.1.1.4. Taxinomie

Selon les auteurs, les algues bleues dites Cyanophycées, Schizophycées, Myxophycées (**Rippka, 1988**), ou Cyanobactéries forment l'embranchement des Schizophytes avec les Bactéries. L'unicité de cette branche tient à trois caractéristiques : les cellules n'ont pas de noyau véritable, pas de plaste et il n'y a pas de reproduction sexuée (**Souissi et al., 2004**).

Environ 250 types différents et plus de 1500 espèces différentes composent les

Cyanobactéries .Les formes les plus nombreuses sont les dulçaquicoles et les subaériennes (**Datta et Keshri ,2014**).

Les Cyanobactéries peuvent être divisées en trois sous-classes : les Coccogonophycidées, qui sont des formes simples ou coloniales à filaments mais sans hormogonie et ne se multiplient que par des coccospores unicellulaires (**Bourelly, 1984**), et les Hormogonophycidées, qui sont des formes filamenteuses à trichomes souvent entourés d'un gaine et multiplier par l'hormogonie pluricellulaire. Les espèces à hétérocystes se retrouvent fréquemment dans cette sous- classe (**Iltis, 1980**). Il existe également la classe des Cyanophycées (**Tab.3**) qui se divise en deux ordres : les Synechococcales et les Spirulinales (**Sennour, 2016**).

Tableau 3 : Systématiques des Cyanophycées (Sennour, 2016)

Classe	Ordre	Famille	Espèce
Coccogonophyceae	Chroococcale	Chroococcaceae	<i>Ex : Chroococcus dispersus</i>
		Microcystaceae	<i>Microcystis aeruginosa</i>
		Chamaesiphonaceae	<i>Ex : Chamaesiphon confervicola</i>
	Pleurocapsales	Hyllaceae	<i>Ex : Pleurocapsa fuliginosa</i>
Hormogonophyceae	Oscillatoriales	Oscillatoriaceae	<i>Ex : Oscillatoria lacustris</i>
	Nostocales	Nostocaceae	<i>Ex : Anabaena torulosa</i>
	Stigonematales	Stigonemataceae	<i>Ex : Stigonema turtaccum</i>
Cyanophyceae	Synechococcales	Synechococcaceae	<i>Ex : Rhabdoderma sp</i>
	Spirulinales	Spirulinaceae	<i>Ex : Spirulina sp</i>

5.2. Les eucaryotes

Ce sont des organismes photosynthétiques unicellulaires ou pluricellulaires, avec une membrane plasmique séparant leur cytoplasme de plusieurs organites nécessaires à leur fonctionnement et à leur métabolisme : chloroplastes, un noyau entouré d'une membrane, cytoplasme, paroi cellulaire, et mitochondries (**Sennour, 2016**) (**Fig. 7**).

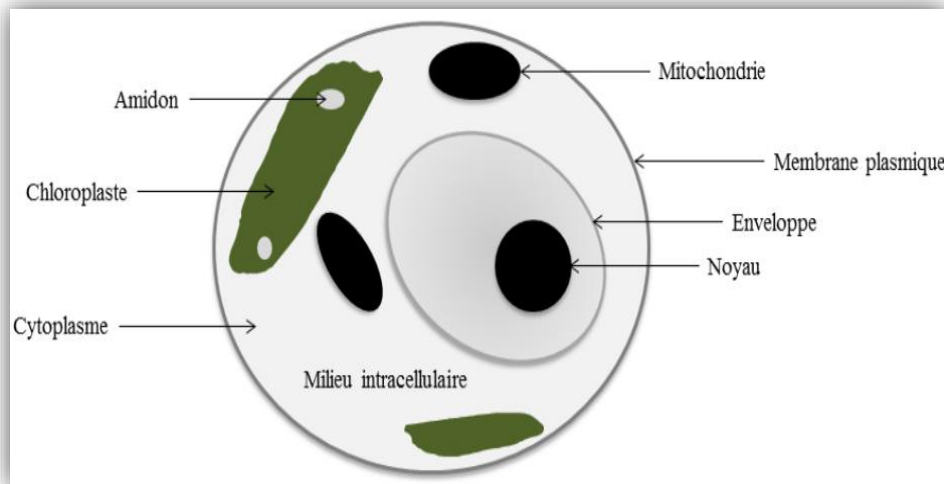


Figure 7: Schéma d'une structure d'algue microscopique unicellulaire (Djoye, 2013)

5.2.1. Chlorophytes (algues vertes)

Les chlorophytes peuvent être soit unicellulaires, soit multicellulaires. Comme chez les végétaux supérieurs, ces algues se distinguent par la présence de chlorophylle « b » et « a » dans leurs plastes, ainsi que de carotènes et de xanthophylle (Pierre, 2010). Les chlorophytes ont de l'amidon dans leurs vacuoles de réserve (Iltis, 1980). Ils se présentent sous forme de cellule solitaires, de colonies, de cénobes ou d'agrégats, de filaments simples ou ramifiés, et de filaments non sérialisés, les formes nageuses ont généralement deux ou quatre flagelles de même taille (Niamien-Ebrotiié, 2010). Il existe environ 8000 types différents d'espèces d'eau douce (Hadi *et al.*, 2016). Les classes les plus importantes de cette division sont: Les Chlorophycées, les Zygothycées et les Ulvophycées (Lopez-Bautista, 2000).

5.1.2. Euglenophytes

Sont des algues flagellées (1-3 flagelles à l'extrémité de la cellule) unicellulaires, rarement coloniales, avec des plastes verts contenant de la chlorophylle a et b, ainsi que du carotène et des xanthophylles, et sans membrane cellulaire (Iltis, 1980). Il existe environ 1000 espèces différentes d'euglénoïdes (Zakryś *et al.*, 2002) que l'on peut trouver en eau douce (Perez, 2015). Les principales réserves de cette algue sont constituées de paramylon, un matériau glucidique, et d'huiles (Kottuparambil *et al.*, 2019). Le type le plus courant est « Euglena », que l'on trouve dans les étangs, les lacs et les marais, surtout lorsque leur eau est polluée par les engrais de leur environnement

(Cantin, 2010).

Tableau 4 : Systématiques des Euglenophycées (Sennour, 2016)

Classe	Ordre	Famille	Espèce
Euglenophyceae	Euglenales	Euglenaceae	<i>Ex : Euglen aehrebergii</i>
	Heteronematales	Heteronemataceae	<i>Ex:Peranema Trichophorum</i>
	Eutreptiale	Eutreptiaceae	<i>Ex : Eutreptia perty</i>

5.2.3. Crysophytes

Sont des algues unicellulaires à plastes bruns ou jaunes qui contiennent de la chlorophylle a et c, du β carotène et plusieurs xanthophylles sous forme enchevêtrée (Iltis, 1980). L'enveloppe de certaines espèces d'algues dormantes est constituée majoritairement de silice, avec une faible quantité de cellulose (Doré-Deschênes, 2009). Les réserves sont constituées de chysolaminarine et d'huiles (Wang *et al.*, 2020). Les chrysophytes se trouvent principalement en eau douce (Cranwell *et al.*, 1988). Il existe de nombreuses formes flagellées dont la majorité à deux fouets inégaux (Houssou, 2012).

Il en existe trois types : les Chrysophycées, les Xanthophycées et les Bacillariophycées ou Diatomées (Bhattacharya *et al.*, 1992).

5.2.4. Pyrophytes

Les pyrophytes sont pour la plupart unicellulaires, mais il existe quelques formes filamenteuses inhabituelles à deux flagelles (Reynolds, 1984). Ils ont des plastes bruns, rouges ou bleu-vert avec des chlorophylles a et c, du carotène et parfois des biliprotéines (Anderson, 2013). Les réserves sont constituées par l'amidon extraplastidial. Ils ont un noyau volumineux avec une structure filamenteuse. Les cellules peuvent apparaître nues ou être entourées d'une thèque bivalve ou cellulosique constituée de plaques polygonales (Niamien-Ebrotiié, 2010).

Les Pyrophyta sont divisés en une classe, les Dinophyceae. Cette dernière contient

plusieurs ordres, parmi eux : les Gonyaulacales et les Peridinales qui contiennent le plus de fossiles (Saldarriaga *et al.*, 2004).

5.2.5. Phaeophytes

Sont toujours pluricellulaires, dont la longueur varie de quelques micromètres (Nemchi, 2006). Ces algues sont les seuls à avoir de la "fucoxanthine" dans leur plaste, ce qui explique leur couleur foncée. En plus de ce pigment, les chlorophylles « a » et « c », « xanthophylles », et autres caroténoïdes peuvent être présents (Sharma, 1986). Les algues brunes sont toujours dépourvues d'amidon ; à la place, ils contiennent la "laminarine" et le "mannitol", et leur membrane cellulaire est composée de pectine et de cellulose (Michel *et al.*, 2010). Elles produisent des polysaccharides à haute viscosité tels que l'agar-agar ou les alginates (Cavalla, 2000) et vivent principalement dans l'eau de mer, où l'on trouve environ 1 500 espèces de Phéophycée (Cole, 1967).

La classe la plus importante de cette division est celle des Phaeophyceae, qui comprend les ordres suivants : Chordariales, Ectocarpales, Laminariales et Fucales (Draisma *et al.*, 2003) (Fig.8).



Figure 8 : *Ectocarpus sp* (Coelho *et al.*, 2020)

5.2.6. Rhodophytes

Algue rouge ou phylum Les rhodophytes sont l'un des plus anciens groupes d'eucaryotes (Bhattacharya *et al.*, 2013), ainsi que l'un des plus importants, avec environ 5 000 à 6 000 espèces d'algues marines multicellulaires vivant dans les océans (Sheath, 2003). La présence d'un pigment appelé phycoérythrine dans leurs plastides

donne à ces algues leur teinte rouge (Nguyen, 2017). Ce pigment est lié à d'autres pigments comme la chlorophylle a et d, les caroténoïdes (caroténoïdes), les xanthophylles, et les biliprotéines (Phycoérythrine et Phycocyanine) (Villay, 2013). Les réserves sont constituées de Rhodamydon ou amidon florideén, ce dernier étant extraplastidial (Plancke, 2008).

Les microalgues rouges sont présentes dans les deux sous-divisions : Cyanidiophytina et Rhodophytina (Yoon *et al.*, 2006).

6. Domaines d'application des algues microscopiques

La première utilisation humaine des algues microscopiques remonte à la période aztèque, la spiruline est la plus utilisée en raison de sa forte teneur en protéines. Les premières études sur la fabrication de ces algues remontent aux années 1960 (Sennour, 2016). Leur culture a commencé dans les années 1970, principalement à des fins aquacoles (Diouf, 2009). De par leurs compositions, les microalgues ouvrent une pléthore d'opportunités de recherche et de filières économiques (Rastoin, 2016), où les protéines, les polysaccharides, les antioxydants, les lipides, les pigments, les vitamines et d'autres composants cellulaires présentent un intérêt particulier. Ces produits dérivés d'algues microscopiques et de cyanobactéries sont vendus dans une variété d'industries (Kherraf, 2018).

Actuellement, la production annuelle totale d'algues microscopiques est estimée à plus de 15 000 tonnes de matière sèche, *Arthrospira (Spirulina) platensis* est la plus cultivée industriellement (Benemann, 2013), suivie par *Chlorella* (38 milliards USD en 2006) et *Dunaliella salina*. Certaines espèces ont déjà été produites et valorisées à travers le monde dans de nombreux domaines, et la biomasse peut être utilisée dans sa totalité ou comme source de produits à haute valeur ajoutée, selon les applications (Lechevantou, 2013).

6.1. Domaines alimentaires

Les algues microscopiques sont constituées de plusieurs pigments tels que les caroténoïdes et la chlorophylle, qui sont couramment utilisés comme colorants naturels dans l'industrie alimentaire, limitant l'utilisation de colorants artificiels (Ben Amor, 2015). Le pigment -carotène est produit par la bactérie *Dunaliella* et est utilisé comme

colorant alimentaire. L'astaxanthine, produite par la bactérie *Haematococcus*, ainsi que la zéaxanthine, la canthaxanthine et la lutéine, sont des antioxydants utilisés en nutrition humaine (Asfour, 2019).

Les algues microscopiques sont considérées comme une source potentielle d'acides gras polyinsaturés (AGPI), qui sont employés dans l'alimentation humaine pour leurs propriétés thérapeutiques et sont également utilisés en nutrition animale (Yaiche, 2019). Ces organismes peuvent produire des AGPI de la $\omega 3$ série, comme l'acide docosahexaénoïque (DHA), l'acide eicosapentaénoïque (EPA) et l'acide α -linoléique (LNA), ainsi que des AGPI de la $\omega 6$ série, comme l'acide arachidonique (AA) et l'acide linoléique « acide LA » (Filali, 2012).

Les algues microscopiques sont également connues pour être une bonne source de vitamines A, B1, B6, D, E et K. Dans l'industrie alimentaire, les polysaccharides de microalgues sont utilisés comme émulsifiants ou épaississants. La molécule glycérol est impliquée dans le système d'osmorégulation des microbes (Kherraf, 2018).

L'utilisation des algues microscopiques comme source de nourriture est le résultat des pratiques des sociétés frappées par la famine. Il y a plus de 2000 ans, les Chinois comptaient sur la microalgue commune *Nostoc* pour se nourrir. Actuellement, les plus connues dans ce domaine sont la spiruline et la chlorella (Celis, 2009).

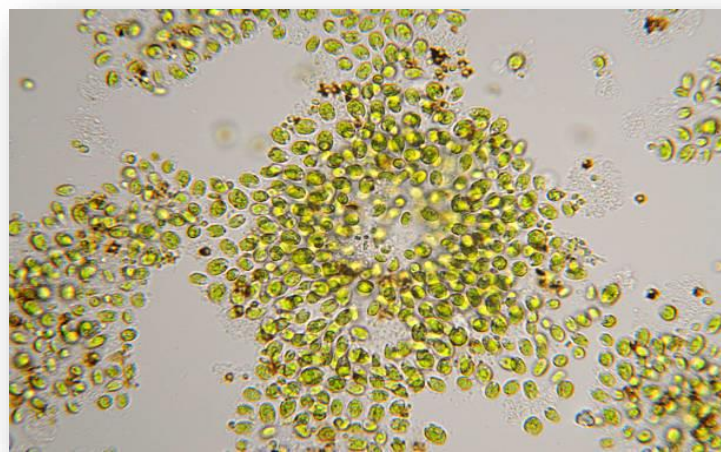


Figure 9: Cellules de *chlorella vulgaris* observées au microscope optique (Clement-Larosiere, 2012).

6.2. Domaines pharmaceutiques

Les pigments, les acides aminés essentiels, les antioxydants et les polyphénols sont tous extraits de microalgues (**Hamedi, 2019**) et leurs extraits peuvent être utilisés dans les crèmes anti-âge, les crèmes anti-rides et les produits de soin régénérants (**Person et al., 2011**). Les algues microscopiques peuvent stocker du sélénium dans leur corps. Cet élément, connu pour ses propriétés antioxydantes en cosmétique, peut également stocker des molécules qui éclaircissent la peau, telles que des molécules antibactériennes, hydratantes ou texturisantes (**Duliège, 2017**).

Les algues microscopiques sont connues pour synthétiser une variété de lipides qui jouent un rôle clé dans la structure des molécules cosmétiques, ainsi que des acides gras polyinsaturés, qui se trouvent à des concentrations plus faibles dans les organismes marins dans leur environnement naturel dans la chaîne alimentaire (**Michaud, 2016**).

6.3. Domaine énergétique

Les algues microscopiques sont valorisées ou recyclables dans une variété d'industries, mais avec l'épuisement des combustibles fossiles qui alimentent le secteur de l'énergie, il y a un intérêt croissant pour leur application dans ce secteur critique de l'économie mondiale (**Stephens et al., 2010**). La génération de bioénergies est connue sous le nom de valorisation de la biomasse, cette biomasse a été définie après le premier choc pétrolier en 1973 comme une masse vivante dont on peut extraire de l'énergie par fermentation. Le carbone de la biomasse est ainsi la source d'énergie renouvelable la plus abondante (**Kpogbemabou, 2011**).

Fabriquer des biocarburants, également appelés biocarburants de troisième génération, avec l'utilisation de microalgues. En effet, ils se distinguent comme des candidats potentiels pour cette application en raison de leur teneur en lipides et de leur capacité à se développer rapidement (**Li-Beisson et Peltier, 2013**).

Les biocarburants sont des carburants liquides ou gazeux produits par une réaction chimique (**Demirbas, 2007**):

- Pour le biodiesel, choisissez entre l'huile (colza, tournesol) et l'alcool (**Ghaly et al., 2010**).

- Pour le bioéthanol, un mélange de sucre fermenté et d'huiles essentielles est utilisé (Tsukamoto *et al.*, 2013).

Depuis 2007, plusieurs investissements ont été réalisés dans la fabrication de biocarburants à base des algues microscopiques, qui peuvent produire une variété de biocarburants, dont le biométhane issu de la digestion anaérobie, le bioéthanol, l'huile liquide et le biodiesel issu de la liquéfaction thermique (Cantin, 2010).

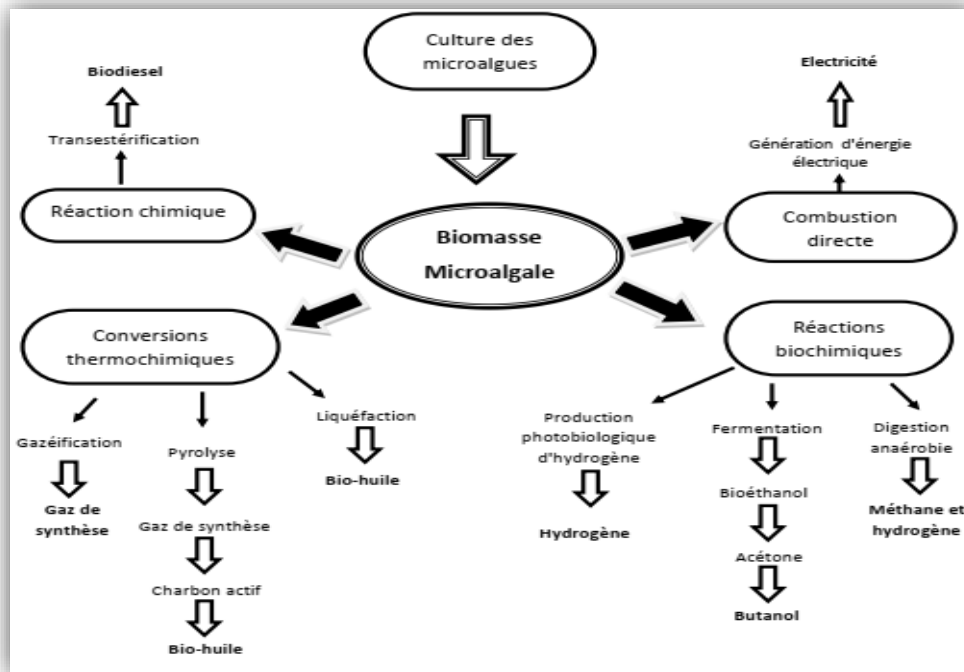


Figure 10: Diagramme représentant les processus de conversion de biomasse microalgale pour la fabrication de biocarburant (Dragon *et al.*, 2010).

6.3.1. Le biodiesel

Certaines espèces de algues microscopiques, telles que *Botryococcus braunii* ou *Schizochytrium sp*, peuvent contenir jusqu'à 80 % de lipides en poids sec. Peut produire des rendements lipidiques 770 fois plus élevés que les graines oléagineuses, et sa culture à grande échelle permet des rendements élevés en biodiesel (Nawaz et Naveed, 2012).

Le biodiesel est fabriqué par hydrogénation d'huiles végétales (HVO) ou transestérification d'acides gras et de triacylglycérols, ce qui aboutit à la création d'esters d'acides gras (EMAG) (Amin, 2019). La technologie est relativement mature et est devenue la norme de l'industrie pour la conversion des huiles végétales en biodiesel (Wolff, 2015). L'un des avantages de l'utilisation des algues microscopiques pour la

production de biodiesel est leur croissance rapide, certaines espèces doublant leur biomasse jusqu'à trois fois en seulement 24 heures (Alam et al., 2012).

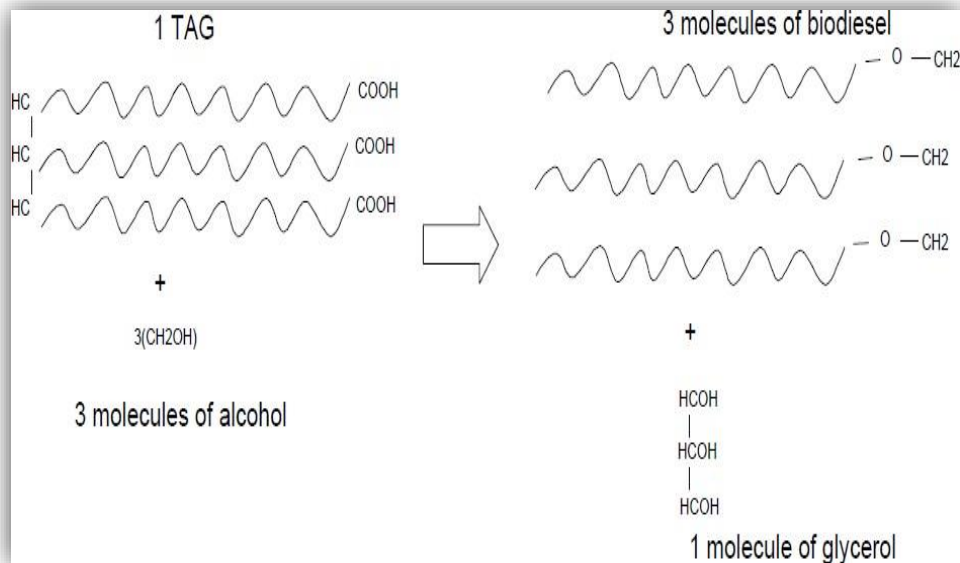


Figure 11 : Formation de biodiesel à partir de la transestérification d'une molécule de triacylglycérol (TAG) dérivée du méthanol. (Wolff, 2015)

6.3.2. Le bioéthanol

Le marché mondial des biocarburants est dominé par la production de bioéthanol (Mabee et Saddler, 2010). Avec 59 % de la production mondiale, les États-Unis (exportations vers le Brésil, le Canada et l'Asie) sont en tête, suivis du Brésil (29 %) et de la Chine. Une petite partie de l'UE est ainsi produite (5 %) (De Mattos Fagundes et al., 2016). Le bioéthanol peut également être fabriqué par fermentation de sucres pour fabriquer de l'alcool, ce qui implique soit la combustion directe de la biomasse, soit des transformations thermochimiques telles que la pyrolyse ou la gazéification (Demirbas, 2007).

6.3.3. Production d'électricité

La production d'électricité est le processus le plus simple à mettre en œuvre. La biomasse est séchée (50-98 % MS) avant d'être brûlée dans une co-combustion avec du carbone. Cette méthode de valorisation de la biomasse algale a le moins d'impact environnemental (Collet, 2012).

6.3.4. Les bio-huiles

Les bio-huiles sont une alternative intéressante aux biocarburants liquides (**Carlsson et al., 2007**) l'ont synthétisé par conversion thermochimique de la biomasse à température élevée et dans des conditions anaérobies. Il existe deux processus différents : la pyrolyse et la liquéfaction thermochimique (**Demirbas, 2000**). Plusieurs recherches sont portées sur le rôle des algues microscopiques dans la production des bio-huiles (**Dote et al., 1994**).

Les coûts de production, l'optimisation des systèmes de culture, les étapes de séparation et de récolte font partie des démarches d'amélioration des procédés. La culture hétérotrophe et le contrôle des paramètres du système de culture améliorent la qualité des biocarburants au niveau du laboratoire (**Miao et al., 2004**).

Chapitre II

Les toxines des algues
microscopiques et des
cyanobactéries

I. Les toxines

Une toxine est une substance chimique d'origine biologique qui pour un ou plusieurs organismes vivants, tels que des champignons, des plantes ou des animaux, des bactéries (Nelsen *et al.*, 2013). Capable de perturber la fonction de cellules particulières à distance de la source d'infection (Brookshire, 2016). Une toxine est définie comme « un produit chimique toxique produit par un organisme vivant qui confère un potentiel pathogène » (Meddour *et al.*, 2020).

Les phycotoxines (toxines algales), les mycotoxines (toxines fongiques), les phytotoxines (toxines végétales) et les veinines (toxines animales, en particulier les vertébrés) sont quelques - uns des termes souvent utilisés (Salzman *et al.*, 2006).

Ces toxines peuvent causer divers problèmes, notamment des maladies humaines causées par la consommation d'eau contaminée par des toxines, la mort par dialyse avec de l'eau contaminée par des toxines, des dermatites par contact avec la peau et des lésions hépatiques à long terme causées par de l'eau contaminée (Coleman *et al.*, 2017).

II. Classification des phycotoxines

Les phycotoxines produites par les efflorescences algales nuisibles (HAB) sont une préoccupation de santé publique et environnementale dans le monde entier (Haberkorn, 2009). Les épidémies persistent, la distribution géographique change et s'étend, et de nouvelles toxines sont découvertes. Ces toxines sont des toxines environnementales naturelles présentes dans l'eau douce, salée, et comprennent :

Les proliférations cyanobactériennes (CyanoHAB) sont des toxines appelées « cyanotoxines », souvent présentes dans les réservoirs d'eau douce et d'eau potable et qui menacent directement la santé humaine.

Les biotoxines ou toxines algales produites par les dinoflagellés et les diatomées peuvent s'accumuler en grandes quantités dans divers tissus d'organismes aquatiques tels que les mollusques, les bivalves et les poissons, entrant dans la chaîne alimentaire et

mettant en danger la santé des consommateurs (**Pulido, 2016**).

II.1. Les cyanotoxines

Les grandes variétés de toxines produites par les cyanobactéries, appelées cyanotoxines, sont à l'origine de nombreux décès de bétail, d'animaux, et plus récemment d'humains (**Osswald et al., 2007**). Celles-ci les toxines sont des métabolites secondaires et se forment à tous les stades de la croissance des cyanobactéries. Ils sont intracellulaires jusqu'à leur libération dans les eaux environnantes lors de la lyse cellulaire due au stress ou à l'âge (**Kaushik et Balasubramanian, 2013**).

Les cyanotoxines peuvent être divisées en deux critères principaux : (1) sur la base de leur mécanisme d'action sur les vertébrés terrestres, en particulier les mammifères (**Ferrão-Filho et Kozlowsky, 2011**). Par exemple, les hépatotoxines (organe cible principal : le foie), les neurotoxines (organe cible : le système nerveux), les dermatotoxines (organe cible : la peau), etc. Et (2) selon leur structure chimique, par exemple, les peptides cycliques, les alcaloïdes ou les lipopolysaccharides (**Zanchett et Oliveira-Filho, 2013**).

1.1. Les hépatotoxines

Ce sont les toxines cyanobactériennes les plus courantes trouvées lors des processus prolifératifs (**Vonarx, 2008**). Elles tuent en 45 min à quelques heures (après injection intrapéritonéale aux souris), résultant d'un choc hémorragique provoqué par un excès de sang dans le foie (**Ashok et al., 2000**). Les hépatotoxines sont également des inhibiteurs des protéines phosphatases 1 et 2A et sont considérés comme de puissants promoteurs tumoraux lors d'expositions chroniques (**Svirčev et al., 2010**). Elles comprennent les microcystines, les nodularines et les cylindrospermines (**Jean, 2013**).

1.1.1. Les microcystines et les nodularines

Les microcystines et les nodularines (**Fig.12**) sont des hépatotoxines peptidiques cycliques (c'est-à-dire qu'elles sont constituées d'acides aminés accrochés ensemble dans une boucle fermée, et elles sont surtout connues pour leur capacité à nuire au foie) (**Beasley, 2020**). Les microcystines sont des heptapeptides (sept acides aminés) et les nodularines sont des pentapeptides (cinq acides aminés) (**Niedermeyer et al., 2014**). Les microcystines sont généralement associées à des sources d'eau douce, et les

nodularines ont été principalement trouvées dans les eaux saumâtres (Mekebri *et al.*, 2009). Les nodularines sont connues pour être produites par *Nodularia spumigena* (Sivonen, 2009). Les microcystines sont produites par de nombreux genres de cyanobactéries, notamment *Anabaena* (maintenant *Dolichospermum* ou *Sphaerospermopsis*), *Microcystis*, *Nostoc*, *Cylindrospermopsis*, *Oscillatoria* (maintenant *Planktothrix*), *Anabaenopsis*, *Hapalosiphon* et *Aphanocapsa* (Di Gregorio, 2014).

Plus de 100 microcystines différentes ont été trouvées dans les plans d'eau à ce jour (D'Anglada *et al.*, 2015). Au moins dix variantes de la nodularine sont connues, et jusqu'à présent, la plus importante d'entre elles est la nodularine-R. Les problèmes les plus connus causés par les microcystines et les nodularines concernent les lésions hépatiques aiguës à chroniques (Beasley, 2020).

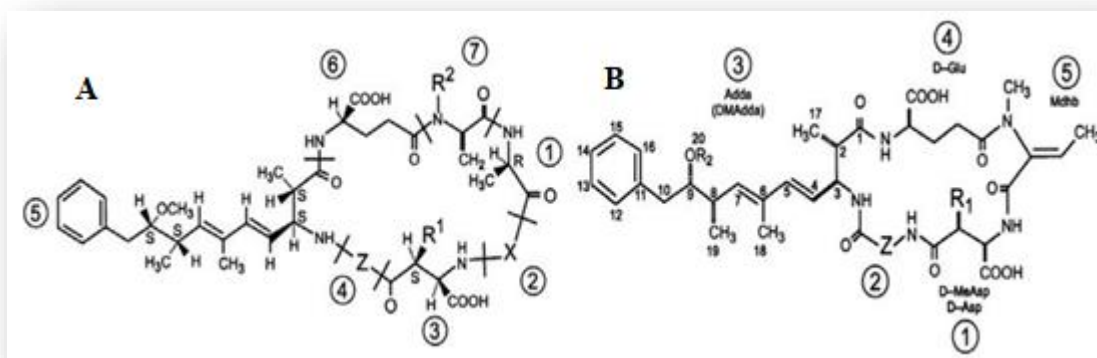


Figure 12 : Structure des microcystines (A) et des nodularines (B). X et Z sont des acides aminés variables, R=H ou CH₃ (Singh et Pathak, 2010).

1.1.2. La cylindrospermopsine et ses analogues

La cylindrospermopsine est un alcaloïde guanidine cyclique d'un poids moléculaire de 415 (Lahrouni *et al.*, 2015) (Fig.13). C'est une cyanotoxine tropicale ou subtropicale qui a récemment été détectée également dans les régions tempérées. La cylindrospermopsine affecte les reins, la rate, le foie, le cœur et le thymus. La cylindrospermopsine pure a une DL50 chez la souris (i.p.) de 2,1 mg kg⁻¹ à 24 h et de 0,2 mg kg⁻¹ à 5–6 jours. Récemment, de nouvelles variantes structurales de la cylindrospermopsine ont été isolées (Sivonen, 2009). L'un a été identifié comme étant la désoxycylindrospermopsine, qui a été signalée comme étant presque non toxique, tandis que la variante structurale, la 7-épicylindrospermopsine, était toxique (Guzmán-

Guillén et al., 2013). Le fragment uracile est important pour la toxicité de la cylindrospermopsine (**Martínez-Ruiz et al., 2020**). La toxine est un inhibiteur de la synthèse des protéines. Il existe des preuves que la cylindrospermopsine peut également être génotoxique. Le rein s'est avéré être l'organe le plus sensible à la toxicité de la cylindrospermopsine (**Humpage et Falconer, 2003**).

La cylindrospermopsine est une petite toxine alcaloïde (c'est-à-dire une toxine organique naturellement synthétisée contenant de l'azote). Il est produit par des membres d'un certain nombre de genres de cyanobactéries, notamment *Cylindrospermopsis*, *Aphanizomenon*, *Umezakia*, *Anabaena* (maintenant *Dolichospermum*), *Lyngbya* et *Raphidiopsis* (**Beasley, 2020**).

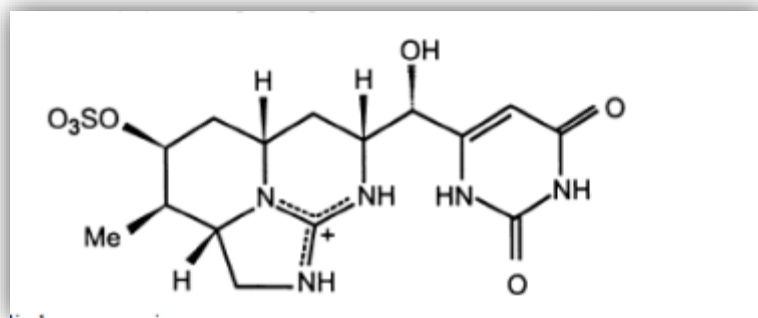


Figure 13: Structure de la cylindrospermopsine (**Kaur, 2019**)

1.2. Les neurotoxines

Les neurotoxines sont des substances synthétiques ou naturelles qui endommagent, détruisent ou altèrent le fonctionnement du système nerveux central et/ou périphérique (**Ashley, 2018**).

Les neurotoxines synthétisées par les cyanobactéries sont classées en deux groupes :

- les anatoxines
- la saxitoxine et ses dérivés (**Boopathi et Ki, 2014**)

1.2.1. Les anatoxines

Les anatoxines sont des alcaloïdes produits exclusivement par les genres cyanobactériens *Anabaena*, *Planktothrix* et *Aphanizomenon*. L'anatoxine-a (**Fig.14**), est une amine secondaire bicyclique dont l'état d'ionisation varie avec le pH ($pK_a = 9,4$). Ce composé est hautement polaire et entièrement soluble dans l'eau (**Robillot et Llewellyn,**

2005). C'est un agent dépolarisant de la jonction neuromusculaire post-synaptique qui provoque une paralysie musculo-squelettique chez les mammifères, entraînant la mort par arrêt respiratoire. Son dérivé méthylé, l'homoanatoxine-a, présente des propriétés très similaires. À un pH élevé (supérieur à 10), les deux toxines deviennent instables et se dégradent très rapidement en analogues non toxiques (Briand, 2008).

L'anatoxine a (165 Da) et l'homoanatoxine (179 Da) sont de puissants agonistes du récepteur ACh, provoquant une excitation prolongée au niveau du NMJ. L'anatoxine a(s) est un organophosphate naturel (*N*-hydroxyguanidine methyl phosphate ester) de 252 Da qui provoque une inhibition prolongée de l'acétylcholinestérase (Humbert, 2009).

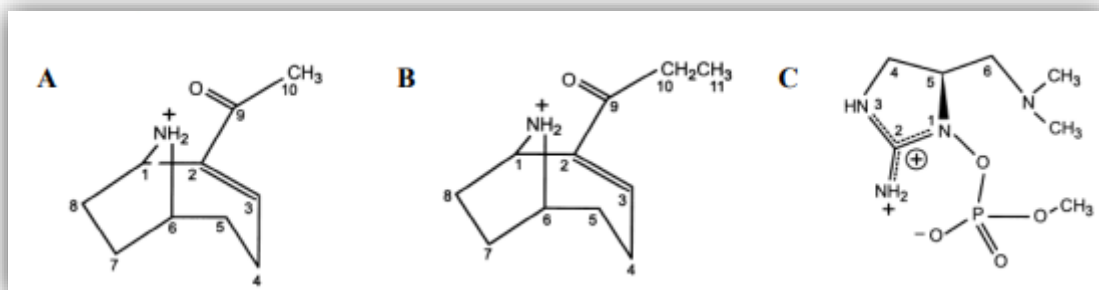


Figure 14: Structure des anatoxines : (A) Anatoxine-a, (B) Homoanatoxine-a et (C) Anatoxine-a(s) (Dumont, 2006).

1.2.2. Les saxitoxines

Les saxitoxines, un bloqueur hautement sélectif et puissant des canaux sodiques voltage-dépendants dans les nerfs moteurs, provoque une paralysie des muscles squelettiques. La plupart des toxicoses humaines à la saxitoxine ont été associées à l'ingestion de crustacés marins, qui accumulent les saxitoxines produites par les dinoflagellés marins (Simmons, 2007). Cependant, les saxitoxines sont également présentes dans les eaux douces, produites par les cyanobactéries des genres *Aphanizomenon*, *Anabaena*, *Planktothrix*, *Cylindrospermopsis*, *Scytonema* et *Lyngbya* (Van der Merwe, 2015).

Les saxitoxines sont des alcaloïdes perhydropuriques tricycliques non volatils hautement polaires (Fig.15) dérivés de l'imidazoline guanidinium. Diverses substitutions structurelles produisent au moins 57 analogues. L'activité est médiée par

des groupes guanidinium chargés positivement. Les saxitoxines sont stables à la chaleur et solubles dans l'eau (Van der Merwe, 2014).

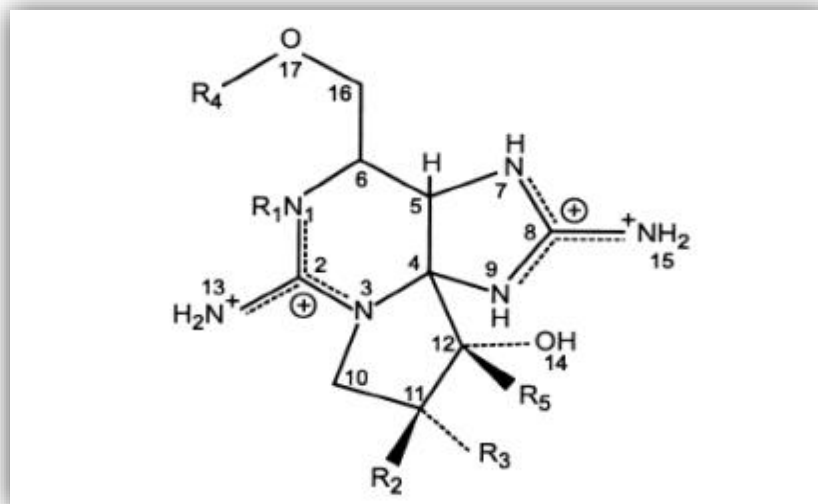


Figure 15 : Structure de la saxitoxine, une cause d'intoxication paralytique par les mollusques. Sa structure est représentative des toxines de ce groupe (Solter et Beasley, 2013).

1.2.3. La β -N-méthylamino-L-alanine ou BMAA

La β -méthylamino-L-alanine (BMAA) est un acide aminé non protéinogène qui a été associé à des maladies neurodégénératives, qui se manifeste dans les maladies humaines dévastatrices que sont la maladie de Parkinson, la sclérose latérale amyotrophique et la maladie d'Alzheimer (Meneely *et al.*, 2016). Cette neurotoxine (Fig.16) est connue pour être produite par presque toutes les espèces testées au sein du phylum des cyanobactéries, y compris les souches libres ainsi que les souches symbiotiques. La distribution mondiale des producteurs de BMAA va d'un écosystème terrestre sur l'île de Guam dans l'océan Pacifique à un écosystème aquatique en Europe du Nord, la mer Baltique, où se produisent chaque année des efflorescences de surface massives (Ferreira Lage, 2016).

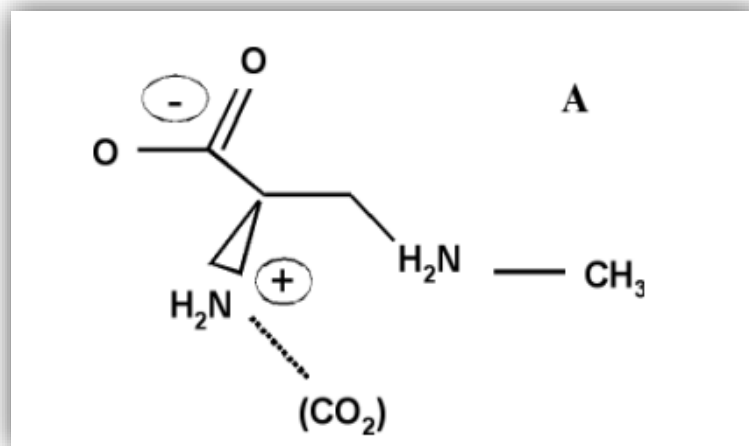


Figure 16: Structure de la β -N-méthylamino-L-alanine (Miyasaka, 2014).

1.3. Les dermatotoxines

Comprennent La lyngbyatoxine, l'aplysiatoxine et la débromoaplysiatoxine qui sont des alcaloïdes produits par les cyanobactéries marines benthiques *Lyngbya*, *Oscillatoria* (*Planktothrix*) et *Schizothrix*, ce sont des activateurs de la protéine kinase C et provoquent une irritation cutanée, la formation de tumeurs et, parfois, une inflammation gastro-intestinale (Spon . New Fetter, 1999) (Fig.17).

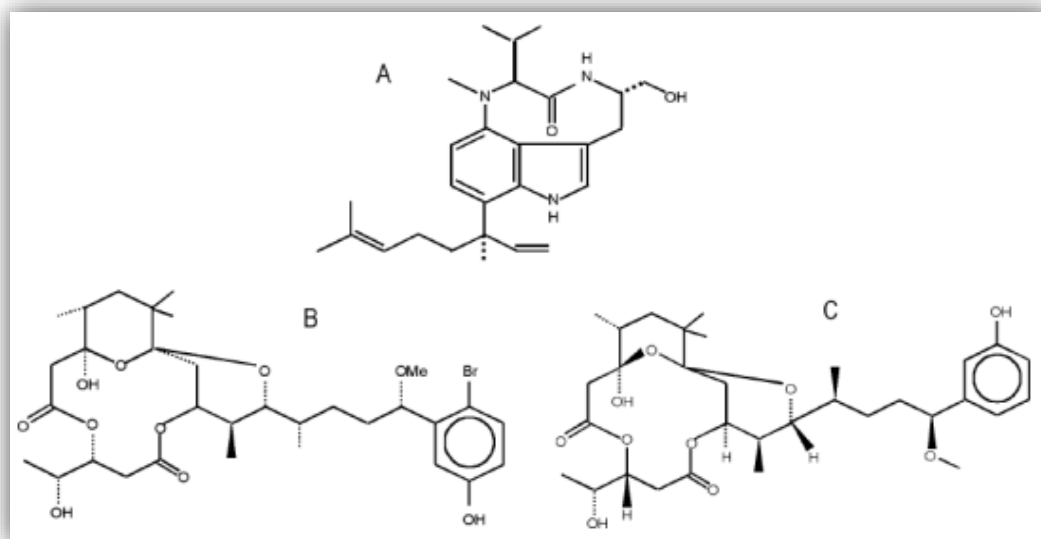


Figure 17: Structures des toxines à effets irritants : (A) lyngbyatoxine A, (B) debromoaplysiatoxine et (C) aplysiatoxine (Levi *et al.*, 2006) .

1.4. Les lipopolysaccharides

Les endotoxines lipopolysaccharidiques (LPS) ont été isolées d'*Anacystis nidulans*, bien qu'elles soient en fait des constituants de la paroi cellulaire à Gram négatif, et sont donc communes à toutes les cyanobactéries. On attribue au LPS cyanobactérien une gamme d'effets pathologiques chez l'homme, allant des maladies gastro-intestinales aux signes et symptômes cutanés, en passant par les allergies, les maladies respiratoires, les maux de tête et la fièvre (Durai *et al.*, 2015).

II.2. Les biotoxines marines

Les biotoxines sont des métabolites secondaires toxiques produits par des espèces phytoplanctoniques toxigènes telles que les algues (unicellulaires) (Plumley, 1997). Ce sont des molécules de taille petite à moyenne (300–3500 Da) qui appartiennent à une variété de composés chimiques. La majorité des biotoxines sont produites par des dinoflagellés (Sharma *et al.*, 2014), qui sont des diatomées qui vivent dans des environnements marins, d'eau douce. Au moins 100 espèces différentes d'organismes peuvent produire des toxines (Philip *et al.*, 2002). L'empoisonnement des humains est causé par la consommation de fruits de mer contaminés par des toxines. Différentes biotoxines ont différents mécanismes moléculaires de toxicité. Les effets de son apport peuvent inclure la paralysie, la neurotoxicité, l'amnésie et la diarrhée. En général, il n'existe pas d'antidote contre la toxicité des biotoxines, et seule une stratégie de gestion efficace peut prévenir une telle toxicité (Sharma *et al.*, 2014).

2.1. Classification selon les propriétés chimiques

Les phycotoxines sont classées selon qu'elles ont une propriété chimique hydrophile (PSP et ASP) ou lipophile (DSP) ; les toxines à cycle imine (NSP et CFP). Cette propriété chimique détermine la meilleure méthode pour isoler et détecter ces toxines algales (Benchhiba, 2021).

2.1.1. Les phycotoxines hydrosolubles

Les phycotoxines paralytiques et les phycotoxines amnésiques sont deux formes de phycotoxines classées dans cette catégorie (Abouabdellah, 2012).

2.1.1.1. Les phycotoxines paralytiques (PSP)

Le premier rapport sur la toxicité du coquillage a été publié en 1798 (**Montabord, 2009**), suite à l'ingestion d'une partie d'un équipage lors d'un voyage le long des côtes canadiennes actuelles en 1793 (**Medhioub, 2011**). Cependant, les symptômes décrits à l'époque ne sont liés à des toxines paralysantes qu'en 1927, suite à une série d'intoxications mortelles liées à la consommation de souris aux États - Unis (**Edwards, 1956**). En 1937, un test toxicologique à base de souris a été utilisé pour surveiller la toxicité des fruits de mer afin de protéger les consommateurs (**Suarez-Isla, 2015**). Paralytic Shellfish Poisoning est le nom anglais de cette maladie (PSP). Intoxication Paralysante by Fruits of the Sea (IPFM) a reçu un nom et une abréviation française (**Kerbrat, 2010**).

Les toxines qui provoquent des intoxications paralysantes appartiennent à un groupe d'une dizaine de molécules chimiquement apparentées, dont la plus courante est la saxitoxine (STX). Il s'agit en fait de la première phycotoxine paralysante découverte, isolée de l'espèce *Saxidomus giganieus* (**Medhioub, 2011**).

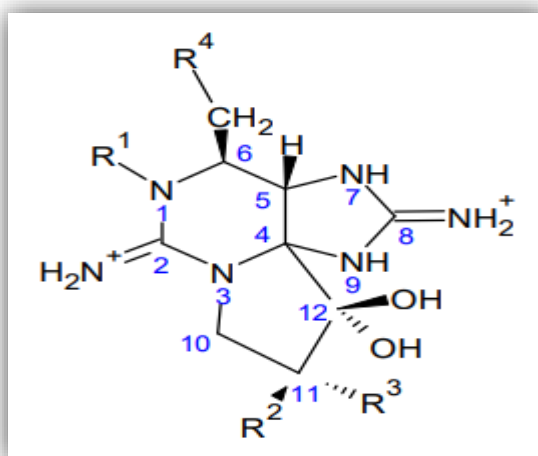


Figure 18 : Structure de base de la saxitoxine et de ses dérivés (**Baut, 2006**)

Ces phycotoxines sont issues de bases tétrahydropuriques, avec des groupements guanidiniques formant les sites actifs de la molécule (**Fig.18**). Le remplacement de groupements particuliers aboutit à une variété de dérivés, qui peuvent être classés :

- les carbamates (STX, néoSTX, GTX1-GTX4)
- les N-sulfocarbamoyles (N-sulfocarbamoyles) (B1-B2, C1-C4),

- Dérivés du décarbamoyle (dc-analogues) (**Benchhiba, 2021**).

Le Paralytic Shellfish Poison (saxitoxine) est une toxine produite par les dinoflagellés appartenant aux genres *Gymnodinium*, *Pyrodinium* et *Alexandrium* (**Wiese et al., 2010**). Ils peuvent provoquer des troubles neurologiques d'apparition rapide chez le consommateur (30 minutes à 12 heures après la consommation) (**Nicolas et al., 2017**), tels que des paresthésies péri-buccales, des paralysies faciales et des arrêts respiratoires (**La vieille et al., 2004**). Des cas de décès potentiellement mortels ont été signalés dans de nombreuses régions du monde, car la paralysie des muscles respiratoires peut entraîner la mort (**Lehane, 2001**). Les toxines PSP sont des neurotoxines potentielles qui bloquent les canaux somatiques, empêchant la génération de potentiels d'action neuronaux et musculaires (effets neurologiques).

L'IPFM est une intoxication qui survient chez l'homme suite à la consommation de coquillages contaminés tels que moules, palourdes, coques, huitres, coquilles, etc. Cependant, d'autres invertébrés marins tels que les crabes peuvent également être des vecteurs (**Abouabdellah, 2012**).

Le traitement le plus efficace de ces intoxications est la vidange gastrique d'urgence ou l'introduction de charbons actifs ou de boissons alcalines, qui favorisent la destruction et l'élimination des toxines par les urines. Il n'existe actuellement aucun antidote aux toxines PSP disponible (**Bertrand et al., 2007**).

2.1.1.2. Les phycotoxines amnésiques (ASP)

Les premiers cas de "toxines amnésiantes (ASP)" ont été signalés à la fin des années 1980 (1987), suite à la consommation de moules récoltées dans l'estuaire de l'Île-du-Prince-Édouard au Canada (**Medhioub, 2011**). Il est à la tête d'un groupe de toxines amnésiques thermostables, hydrosolubles et intolérantes aux acides (**Abouabdellah, 2012**).

L'acide domoïque est une toxine produite par certaines diatomées (en particulier, *Pseudo-nitzschia multiseries*, *Pseudo-nitzschia pseudodelicatissima*, *Pseudo-nitzschia pungens* et *Pseudo-nitzschia delicatissima*) (**Bertrand et al., 2007**).

C'est un acide aminé tricarboxylique (**Fig.19**) qui est structurellement similaire à un acide kaniique, avec le récepteur kanate comme l'un des récepteurs. Glutamatergiques du système nerveux central et les isomères apparaissent quand la température augmente, seuls l'acide épidoïque et les acides D, E et F ont été associés à des intoxications amnésiantes (**Ramsdell, 2008**).

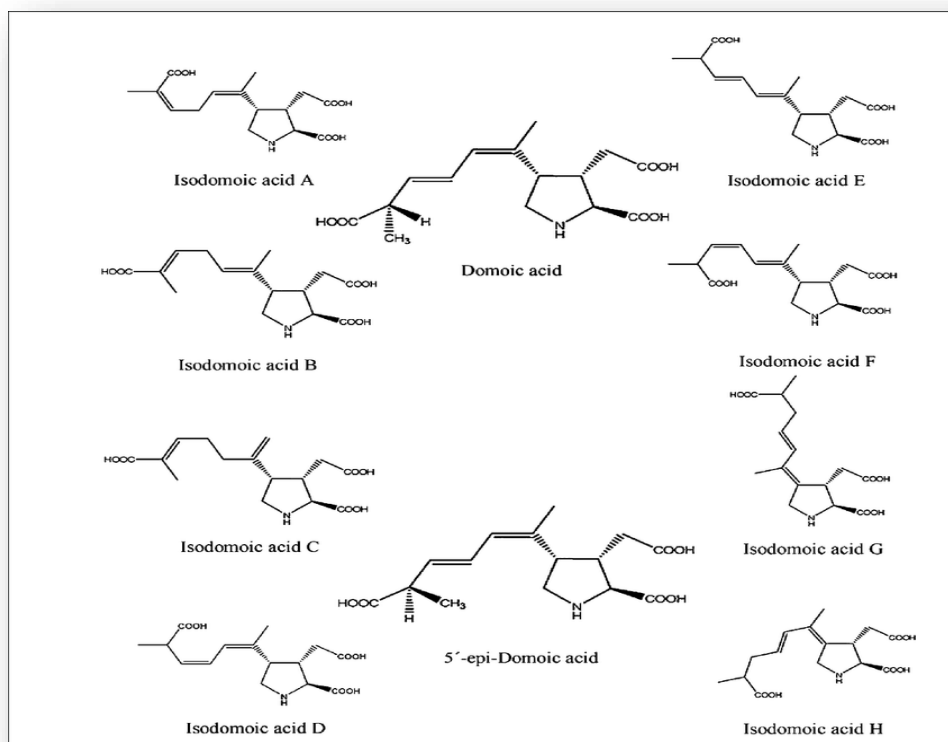


Figure 19: Structure de l'acide domoïque et de ses isomères (**Munday et al., 2008**)

Les patients présentent des signes classiques d'intoxication alimentaire (vomissements, crampes d'estomac, évitement, etc.) dans un court laps de temps après la prise. Puis, environ deux jours plus tard, des troubles neurologiques apparaissent (céphalée, problèmes de mémoire, désorientation, coma, etc.). Ces troubles neurologiques peuvent durer des semaines après l'intoxication, voire entraîner la mort (**Abouabdellah, 2012**).

Ce type d'intoxication touche principalement les enfants et les personnes âgées. Il convient de noter que la gravité des symptômes neurologiques est liée à l'âge du patient. Plus le sujet vieillit, plus les signes cliniques apparaissent (**Bertrand et al., 2007**).

2.1.2. Phycotoxines lipophiliques

Les polyéthers linéaires et macrocycliques sont les types de phycotoxines les plus abondants et les plus diversifiés, avec des similitudes structurelles avec celles trouvées chez les bactéries (certains envisagent). Cette similitude suggère que certains dinoflagellés de niveau inférieur produisent ce type de poison symbiotique (**Baut, 2006**).

2.1.2.1. Phycotoxines diarrhéiques (DSP)

Le syndrome d'intoxication diarrhéique aux mollusques (DSP, diarrhoeic shellfish poisoning) est une intoxication alimentaire provoquée par la consommation de crustacés contenant des biotoxines produites par les dinoflagellés (algues planctoniques). Il s'agit d'une maladie gastro-intestinale sans symptômes neurologiques. Les premiers cas ont été signalés aux États - Unis dans les années 1960. Depuis lors, des épidémies ont été signalées au Japon, en Europe, en Amérique du Sud et au Moyen -Orient (**De Schrijver et al., 2002**). L'intoxication diarrhéique est causée par un groupe de polyéthers, dont l'acide okadaïque (AO), les dinophysistoxines (DTX), les pecténotoxines (PTX) et les yessotoxines (YTX) (**Louzao et al., 2022**).

En Belgique et en Europe, les études de cas bien documentées sont rares, ce qui peut s'expliquer en partie par le sous-diagnostic et la sous-déclaration (**De Schrijver et al., 2002**). Le DSP (Diarrheic Shellfish Poison) est capable de provoquer chez le consommateur des troubles digestifs qui apparaissent rapidement (30 minutes à 12 heures après la prise), sans être mortels la plupart du temps, notamment chez les personnes dont la santé est fragilisée (**Nicolas et al., 2017**).

Outre les trois groupes de toxines les plus connus, il en existe d'autres comme les brevétoxines, les ciguatoxines et, plus récemment, les azaspiracides, les spirolides et le gymnodinium. Les symptômes de toutes les intoxications sont de nature digestive ou neurologique (**Delahaut et Dubois, 2014**).

a. L'acide okadaïque (OA) et Les dinophysitoxines (DTXs)

Ces toxines sont produites par les dinoflagellés *Dinophysis* et *Prorocentrum*, ainsi que par les bactéries du clade Roseobacter qui sont liées à ces dinoflagellés (**Perez et**

al., 2008). Initialement, l'acide okadaïque a été utilisé pour isoler de la mer les Eponges appartenant au genre *Halichondria*, dont *H. okadai* (Dom, 2018). L'acide okadaïque et les dinophysistoxines sont structurellement similaires et agissent par des mécanismes toxiques similaires (Windust *et al.*, 1996).

Les DTX sont des polyéthers lipophiles linéaires (C38) qui s'accumulent dans le coquillage hépatopancréas, et non macrocycliques. Ils sont de nature acide, résultant de la substitution des radicaux de l'acide okadaïque (Abouabdellah, 2012). Le DTX-1 (dérivé méthylé de l'AO) a été la première toxine diarrhéique isolée des coquillages (Yasumoto *et al.*, 1978). Le DTX-2 (un isomère de l'AO) a été découvert bien plus tard, dans les années 1990 en Irlande (Mondeguer et Baut, 2005) (Fig.20).

Elle a été isolée suite à des coquillages contaminés par *Dinophysis acuta*. En ce qui concerne le DTX-3, il a été découvert en 1985 par YASUMOTO et ses collègues. Ce composé appartient à une classe de dérivés toxiques appelés acyles-esters, qui résultent de l'acylation au niveau de l'hydroxyle carbone 7 de l'AO, DTX-1 et DTX-2 (Dominguez *et al.*, 2010). Les AO, DTX-1, DTX-2 et DTX-3 ont été isolés dans des coquillages, cependant DTX-4 et DTX-5, qui ne semblent pas être directement toxiques, n'ont été trouvés que dans le phytoplancton (Ben Haddouch *et al.*, 2017).

Les humains sont exposés à l'acide okadaïque et aux dinophysistoxines par la consommation de moules, de palourdes et d'autres bivalves qui se contaminent en se nourrissant de dinoflagellés toxiques (Reizopoulou *et al.*, 2008). Diagnostic, traitement et suivi Les tests diagnostiques sont rarement utilisés pour traiter les maladies causées par cette famille de toxines. Au lieu de cela, la majorité des diagnostics reposent sur l'apparition de signes cliniques dans les heures suivant l'ingestion de mollusques filtrants tels que les moules. Le traitement est souvent symptomatique et la guérison complète survient généralement en trois jours (Solter et Beasley, 2013).

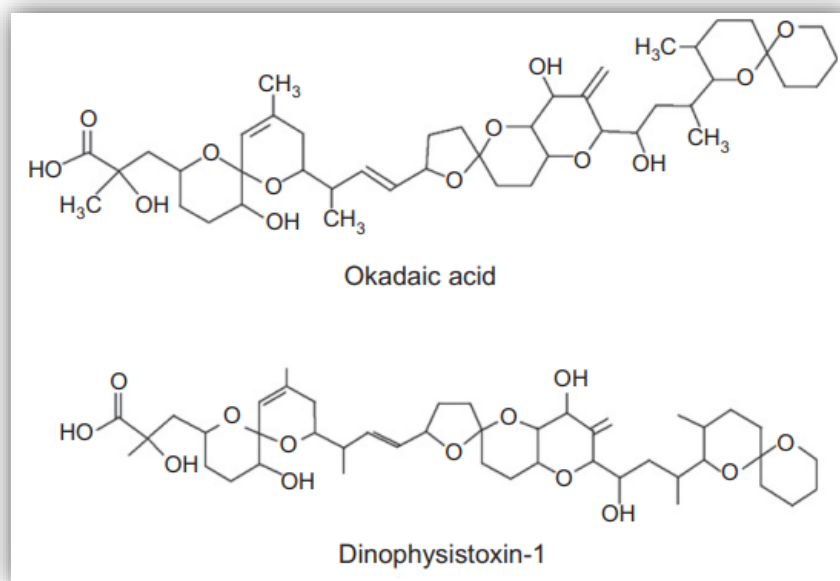


Figure 20 : Structures de base de l'acide okadaïque et dinophysistoxine-1, qui produisent des intoxications diarrhéiques dans les coquillages (**Okamoto et Fleming, 2005**).

b. Les pectinotoxines

Les pecténotoxines (PTX) sont une classe de biotoxines marines dont la structure est à base de polyéther lactones produites par un nombre limité d'espèces de phytoplancton qui les consomment en Australie (1997), au Japon dans les années 1980, en Nouvelle- Zélande et en Europe (**Dom, 2018**). Ils sont à l'origine d'intoxications alimentaires humaines : c'est le cas des bivalves filtrants comme les huîtres et les moules (**Farabegoli et al., 2018**).

Comme les organismes producteurs sont les mêmes, ces toxines sont fréquemment associées aux DTX dans l'environnement (*Dinophysis fortii* et *acuta*) (**Maurer et al., 2010**). La structure chimique est similaire, mais la condensation conduit à une lactone macrocyclique (**Baut, 2006**). Des effets diarrhéiques ne sont observés qu'après administration orale, bien que des lésions gastro-intestinales et hépatiques soient montrées après injection IP (**Munday et Reeve, 2013**).

Les différents analogues sont principalement le résultat de transformations métaboliques chez les mollusques : par exemple, le groupement méthyle en position 43 de PTX2 est progressivement oxydé en alcool (PTX1), aldéhyde (PTX3) et acide

carboxylique (PTX6), alors que le seco-acide forme de PTX2 (PTX2sa) est la résultat de l'hydrolyse de la fraction lactone avec ouverture de macrocycle (Miles et al., 2004) (Fig.21).

Parmi ce groupe, La pecténotoxine 2 est le composant le plus étudié de cette catégorie. Malgré le fait qu'aucun lien n'a été démontré entre la contamination par le PTX-2 et la diarrhée (Luckas et al., 2017).

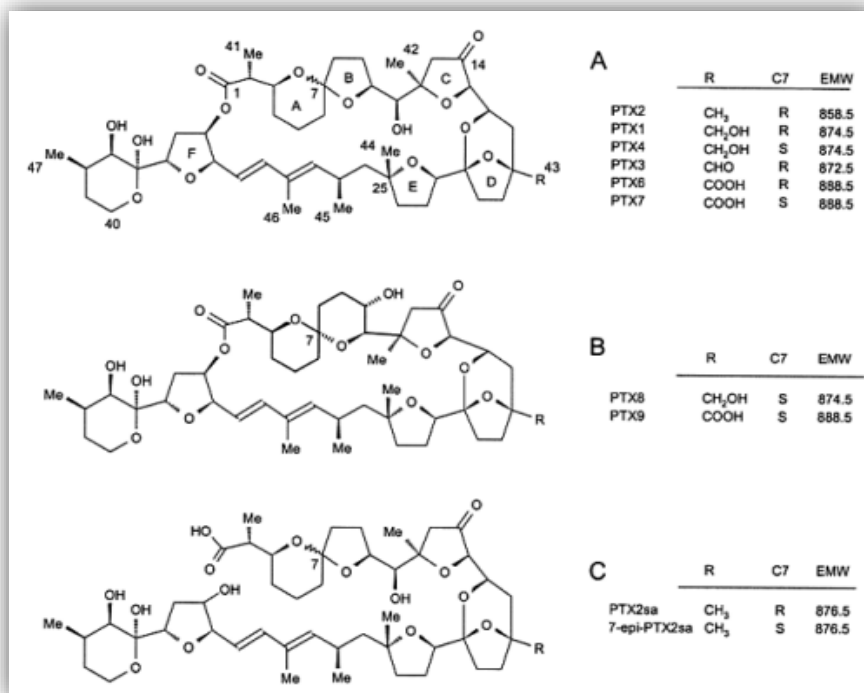


Figure 21 : Structure chimique des pecténotoxines (Paz et al., 2008)

c. Les yessotoxines (YTX)

Les yessotoxines (YTX) sont une classe de toxines polyéthers qui ont été isolées pour la première fois en 1986 à partir de la bactérie *Patinopecten yessoensis*. Suite à cela, il a été découvert que YTX est produit par les dinoflagellés *Protoceratium reticulatum*, *Lingulodinium polyedrum* et *Gonyaulax spinifera* (Paz et al., 2008). L'YTX s'accumule dans les coquillages et est toxique pour la souris par injection intrapéritonéale, provoquant des symptômes similaires à ceux provoqués par les toxines paralysantes du coquillage (PSP). Pour ces raisons, YTX était traditionnellement inclus dans la catégorie DSP (Dom, 2018).

Cependant, il a récemment été proposé d'exclure les YTX du groupe des DSP car

coquillages. Elle est cytotoxique pour les cellules et un inhibiteur des canaux Ca^{2+} dans les membranes plasmiques. Les symptômes commencent 6 à 18 heures après l'ingestion et comprennent des nausées, des vomissements, des crampes d'estomac sévères et de la diarrhée, qui persistent souvent jusqu'à 5 jours (**Robert et al., 2015**).

L'azaspiracide (AZA1) est le type d'AZA le plus courant et le plus important dans les mollusques, tandis que l'AZA2–11 sont les dérivés méthyliques ou hydroxylés ou les isomères spatiaux de l'AZA1. On pense que AZA1–3 sont les produits naturels produits par le dinoflagellé et AZA4–11 sont des métabolites biotransformés à partir de coquillages (**Wu et al., 2019**).

L'intoxication à l'azaspiracide (AZP) est un syndrome toxique marin nouvellement identifié, causé par la consommation de moules (*Mytilus edulis*) contaminées par le dinoflagellé *Protoperidinium crassipes*. Les symptômes typiques de l'AZP ressemblent à ceux du DSP, tandis que des symptômes neurotoxiques sont également observés dans certains incidents d'empoisonnement (**James et al., 2004**).

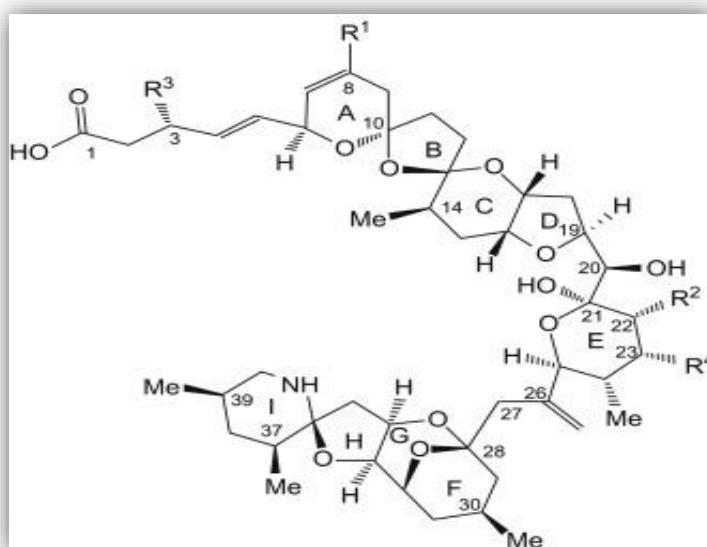


Figure 22 : La structure de l'azaspiracide (**Seymour et al., 2015**)

III. Les méthodes de détection des phycotoxines

Les phycotoxines les plus courantes sont réparties en trois groupes, chacun correspondant aux symptômes qu'elles provoquent. La DSP, l'ASP et la PSP sont respectivement des toxines diarrhéiques, amnésiques et paralysantes (**Visciano et al.,**

2016).

Pour la DSP, le dosage biologique sur souris et rats n'est plus considéré comme un outil de contrôle adéquat au niveau européen (capacité de détection insuffisante et trop grande variation de résultats). En conséquence, une méthode de chromatographie liquide - spectrométrie de masse (LC-MS/MS) a été validée dans le cadre d'une étude interlaboratoire européenne et doit être considérée comme la méthode de référence. Des méthodes alternatives, telles que le test Abraxis Elisa (distribué par Novakits), sont capables de détecter la présence d'acide okadaïque et peuvent être utilisées comme méthode de référence, ses dérivés dans les 24 heures (**Campàs et al., 2007**).

Il existe une méthode chromatographique officielle pour détecter les toxines causant l'amnésie (ASP). Au niveau des autres méthodes, également la présence d'un kit Biosense Elisa et d'une bandelette de test Neogénération (**McLeod et al., 2015**). Les toxines PSP, peu nombreuses en France, doivent également être surveillées en cas d'importation de produits de la mer en provenance des zones concernées. Pour les détecter, de nombreuses méthodes Elisa sont disponibles sur le marché, comme un kit Abraxis en cours de procédure régulière la concrétisation (**Dillon et al., 2021**).

Conclusion

Au cours de la dernière décennie, l'industrie des algues microscopique y compris les cyanobactéries a connu un regain d'intérêt en raison de la qualité nutritionnelle relativement élevée et de l'abondance de molécules bioactives présentes dans ces organismes, qui sont principalement des eucaryotes et des procaryotes. Ses principaux domaines d'intérêt et de profit sont : l'alimentation, la fabrication sous toutes ses formes, l'agriculture, la médecine et l'énergie, les cosmétiques et les carburants. Par conséquent, une meilleure compréhension de leurs propriétés physiologiques, morphologiques, biochimiques et moléculaires peut être utile en biotechnologie. Les scientifiques s'intéressent de plus en plus aux interactions entre microbes afin de prévoir leur évolution : « Chaque microalgue a un rôle spécifique dans la communauté de phytoplancton. Soit ils s'attirent, soit ils rivalisent avec leurs voisins.

En plus ces microorganismes produisent des molécules à caractère toxiques telle que les toxines végétales, également appelées toxines huîtres, qui sont produites par des algues microscopiques libres nourries par les huîtres. Les toxines sont concentrées dans les huîtres, qui agissent comme vecteurs de transmission des composés toxiques tout au long de la chaîne alimentaire. Les cyanobactéries produites des grandes variétés de toxines, appelées cyanotoxines, celles-ci les toxines sont des métabolites secondaires et se forment à tous les stades de la croissance des cyanobactéries 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. Ils sont intracellulaires jusqu'à leur libération dans les eaux environnantes lors de la lyse cellulaire due au stress ou à l'âge. Il est essentiel de surveiller la présence de ces toxines dans les aliments car elles peuvent provoquer un empoisonnement neurologique, une diarrhée, une paralysie ou une perte de mémoire.

Pour prévoir son évolution, il faut donc comprendre cette communauté ». Les scientifiques s'intéressent également à l'évolution future des microbes toxiques, sachant que le changement climatique affecterait la température, la salinité et le pH de l'eau. De ce fait, il est possible d'anticiper des températures plus douces favorisant les efflorescences, car c'est un facteur déclenchant la floraison au printemps et en été. Cependant, une baisse du pH peut entraver la croissance de certains organismes.

Références Bibliographiques

A :

- **Abouabdellah, R.** (2012). Étude des phycotoxines paralytiques et lipophiles chez les mollusques bivalves de l'Atlantique sud marocain. Thèse de doctorat. pp 174.
- **Agouni, M.** (2012). Caractérisation physico-chimiques et étude des cyanobactéries dans le barrage d'Ain El Dalia (Région de Souk Ahras). Mémoire de magister, Université deSouk Ahras-Algerie. pp 100.
- **Agrawal, S. C.** (2012). Factors controlling induction of reproduction in algae—review: the text. *Folia Microbiologica*. 57(5), 387–407.
- **Alam, F., Date, A., Rasjidin, R., Mobin, S., Moria, H., Baqui, A.** (2012). Biofuel from algae-Is it a viable alternative?. *Procedia Engineering*. 49, 221-227.
- **Alfonso, A., Vieytes, M., Botana, L.** (2016). *Yessotoxin, a Promising Therapeutic Tool. Marine Drugs*. 14(2), 30.
- **Allen, M. M.** (1984). Cyanobacterial cell inclusions. *Annual reviews of microbiology*. 38(1), 1-25.
- **Amin, A.** (2019). Review of diesel production from renewable resources: Catalysis, process kinetics and technologies. *Ain Shams Engineering Journal*. 10(4), pp 821-839.
- **Anderson, O. R.** (2013). Comparative protozoology: ecology, physiology, life history. Springer Science & Business Media. pp 481.
- **Asfour, N.Y.** (2019). Production en masse de microalgues : optimisation des paramètres physico-chimiques. Thèse de doctorat. Université Oran. pp 190.
- **Ashley, H.** (2018). Neurotoxins: Definition, Epidemiology, Etiology. *Medscape*.
- **Ashok, K., Singh, D. P., Tyagi, M. B., Kumar, A., Prasuna, E. G., Thakur, J. K.** (2000). Production of hepatotoxin by the cyanobacterium *Scytonema* sp. strain BT 23. *Journal of microbiology and biotechnology*. 10(3), 375-380.

B :

- **Barberousse, H.** (2006). Étude de la diversité des algues et des cyanobactéries colonisant les revêtements de façade en France et recherche des facteurs favorisant leur implantation. Thèse de doctorat. Museum national d'histoire naturelle - MNHN Paris. France. pp 192.

- **Barnes, R. S. K., Mann, K. H.** (Eds.). (2009). Fundamentals of aquatic ecology. John Wiley & Sons. pp 269.
- **Baut, M. L.** (2006). The toxins of marine microalgae. *Biofutur*. 272, pp 35-39.
- **Beasley, V. R.** (2020). Harmful Algal Blooms (Phycotoxins). *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. Elsevier.
- **Ben Amor, H.** (2015). Etude et optimisation de bioaccumulation de Mg²⁺ dans les microalgues “ *Chlorella vulgaris* ”. Thèse de doctorat. Université Paris-Saclay; Université de Sfax (Tunisie). France. pp 215
- **Benchhiba, M.** (2021). Intoxications alimentaires par les phycotoxines, une enquête auprès de 260 marocains. Thèse de doctorat. pp 163
- **Benemann, J.** (2013). Microalgae for biofuels and animal feeds. *Energies*. 6(11), 5869-5886.
- **Ben Haddouch, A. Amanhi, R. Amzil, Z. Taleb, H. Rovillon, G. A. Adly, F. Loutfi, M.** (2017). Lipophilic toxin profile in *Mytilus galloprovincialis* from the North Atlantic coast of Morocco: LC-MS/MS and mouse bioassay analyses. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. 6(2), 10.
- **Bertrand, F., Dunand, A., Fosse, J., Fradin, N., Liger, D., Keck, G.** (2004). Les intoxications par les cyanobactéries. *Lyon*. 35, 46-51.
- **Bertrand, N., Cathala, D., Delahaie, S.** (2007). Atelier Santé et Environnement: Les toxines marines sur le littoral français, état des connaissances. pp 55.
- **Bhattacharya, D., Medlin, L., Wainright, P. O., Ariztia, E. V., Bibeau, C., Stickel, S. K., Sogin, M. L.** (1992). Algae containing chlorophylls a+ c are paraphyletic: molecular evolutionary analysis of the Chromophyta. *Evolution*. 46(6), 1801-1817.
- **Bhattacharya, D., Price, D. C., Chan, C. X., Qiu, H., Rose, N., Ball, S., Yoon, H. S.** (2013). Genome of the red alga *Porphyridium purpureum*. *Nature communications*. 4(1), 1-10.
- **Blais, S.** (2008). Guide d'identification des fleurs d'eau de cyanobactéries. Comment les distinguer des végétaux observés dans nos lacs et nos rivières. Québec. 3e édition. Direction du suivi de l'état de l'environnement, ministère du développement durable, de l'Environnement et des parcs. pp 66.
- **Blin, A.** (2009). L'historique et le présent des efflorescences de cyanobactéries au lac Brome (Québec) en relation avec les perturbations du bassin versant : paléopigments,

akinètes et phytoplancton. Mémoire présenté comme exigence partielle de la maîtrise en biologie;[directrice de recherche, dolors planas].pp 156.

- **Boileau, M. È.** (2015). Évaluation du potentiel d'utilisation d'une eau usée industrielle comme substrat de culture pour des microalgues d'eau douce dans une optique de production de biocarburants de 3e génération. Mémoire du grade de Maître en environnement (M. env.) Université de Sherbrooke. pp 97.
- **Boopathi, T., Ki, J. S.** (2014). Impact of environmental factors on the regulation of cyanotoxin production. *Toxins*. 6(7), 1951-1978.
- **Bouchentouf, M., Abdarrahmane, M.** (2021). Traitement des eaux usées par les microalgues. Mémoire de master. Université Ahmed Draia. Adrar. pp 99.
- **Bourrelly, P.** (1984). Algues d'eau douce de la Nouvelle Calédonie recueillies par la Mission F. Starmühlner en 1965 (Diatomées exclues). II. Chlorophycées (Desmidiées) and Charophycées. *Revue d'hydrobiologie tropicale*. 17(2), 101-115.
- **Bourrelly, P. Lefevre, J.C.** (2022). Cyanobactéries ou Cyanophycées, anc. Algues Bleues, *Encyclopædia Universalis*.
- **Briand, E.** (2008). Contribution à la compréhension du déterminisme de la mise en place des proliférations de cyanobactéries et de leur production de toxines .Thèse de doctorat. Paris. Muséum national d'histoire naturelle.pp 270
- **Brookshire, B.** (2016) .Scientists Say: Poisonous. Science News for Students.
- **Buehner, M. R., Young, P. M., Willson, B. D.** (2016). Physics-based microalgae growth modelling and control for a vertical flat panel photobioreactor. 4(4), 32-47.

C :

- **Cadoret, J., Bernard, O.** (2008) .La production de biocarburant lipidique avec des microalgues : promesses et défis. *Journal de la Société de Biologie*. 202 (3), 201-211
- **Cantin, I.** (2010). La production de biodiesel à partir des microalgues ayant un métabolisme hétérotrophe. *Maîtrise en environnement (M. Env)*. Université de Sherbrooke, Sherbrooke. pp 97.
- **Carlsson, A.S., Van Beilen, J.B., Möller, R., Clayton, D.** (2007).Micro-and macro-algae: utility for industrial applications, In: Bowles D, editor. *Outputs from the EPOBIO project*. UK: CPL Press. pp 86.
- **Caruana, A. M., Amzil, Z.** (2018). Microalgae and toxins. In *Microalgae in Health and Disease Prevention* .Academic Press. 263-305.

- **Cavalla, M.** (2000). Les algues - Les micro algues, *In Mcavalla.free.fr*. pp 17.
- **Chojnacka, K., Marquez-Rocha, F. J.** (2004). Kinetic and stoichiometric relationships of the energy and carbon metabolism in the culture of microalgae. *Biotechnology*. 3(1), 21-34.
- **Clément-Larosière, B.** (2012). Etude de la croissance de *Chlorella vulgaris* en photobioréacteur batch et continu, en présence de concentrations élevées de CO₂. Thèse de doctorat. Châtenay-Malabry, École centrale de Paris. pp 232.
- **Coelho, S.M., Peters, A.F., Müller, D., Cock, J.M.** (2020). *Ectocarpus* : un modèle evo-devo pour l'algue brune. *EvoDevo* .11(1).
- **Cole, K.** (1967). Chromosome numbers in the Phaeophyceae. *Canadian journal of genetics and cytology*. 9(3), 519-530.
- **Coleman, N., Castrejon, A., Blaine, C., Chemmachel, T.** (2017). The toxicology of essential and nonessential metals. Lulu. com.
- **Collet, P.** (2012). Analyse de Cycle de Vie de la valorisation énergétique de la biomasse algale : prise en compte des aspects dynamiques dans l'étape d'inventaire. Thèse de doctorat. Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier. France .pp 286.
- **Cranwell, P. A., Creighton, M. E., Jaworski, G. H. M.** (1988). Lipids of four species of freshwater chrysophytes. *Phytochemistry*. 27(4), 1053-1059.

D :

- **Damerval, T., Houmard, J., Guglielmi, G., Csiszar, K., Tandeau De Marsac, N.** (1989). Différenciation des hormogonies chez une cyanobactérie: organisation et expression des gènes spécifiant les vésicules à gaz. Bulletin de la Société botanique de France. *Actualités botaniques*. 136(1), 155–157.
- **D'Anglada, L. V., Donohue, J. M., Strong, J., Hawkins, B.** (2015). Health effects support document for the cyanobacterial toxin cylindrospermopsin. US Environmental Protection Agency, Office of Water, Health and Ecological Criteria Division. pp 76.
- **Datta, S., Keshri, J. P.** (2014). Soil and sub aerial blue green algae (Cyanoprokaryotes) of Burdwan. West Bengal. India. *Vegetos* .27, 112-126.
- **Dejoye, C.T.** (2013). Eco-Extraction et analyse de lipide de micro-algues pour la production d'algocarburant. Thèse de doctorat. Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse. France .pp 176.

- **Delahaut, P., Dubois, M.** (2014). Les phycotoxines: un problème émergeant pour la santé publique. LabInfo Publication destinée aux laboratoires de sécurité alimentaire agréés. CER Groupe - Département Santé, Rue du Point du Jour 8, 6900 Marloie, Belgique. pp 7-9.
- **De Mattos Fagundes, P., Padula, A. D., Padilha, A. C. M.** (2016). Interdependent international relations and the expansion of ethanol production and consumption: the Brazilian perspective. *Journal of Cleaner Production*. 133, 616–630.
- **Demirbas, A.** (2000). Mechanisms of liquefaction and pyrolysis reactions of biomass. *Energy Conversion and Management* 41(6), 633-646.
- **Demirbas, A.** (2007). Progress and recent trends in biofuels. *Progress in energy and combustion science*. 33(1), 1-18.
- **De Schrijver, K., Maes, I., De Man, L., Michelet, J.** (2002). Une épidémie d'intoxications diarrhéiques dues aux fruits de mer à Anvers, Belgique. *Eurosurveillance*. 7(10), 138-141.
- **Didur, O.** (2014). Altération de l'activité photochimique de la photosynthèse ainsi que la sensibilité aux effets toxiques de xénobiotiques durant le cycle cellulaire chez *Chlamydomonas reinhardtii*. Thèse de doctorat. Université du Québec À Montréal. pp 199.
- **Di Gregorio, F. N.** (2014). New criteria and methods for cyanobacteria risk assessment and risk management in water for human consumption. Thèse de doctorat. *Università degli Studi di Roma" La Sapienza*. pp 130.
- **Diouf, D.** (2009). Production d'aliments enrichis en acides gras polyinsaturés à partir de microalgues pour les besoins aquacoles .Thèse de doctorat .Université du Québec à Rimouski. pp 139.
- **Dom, I.** (2018). Analyse non Ciblée des Biotoxines Marines dans les Produits de la Pêche .Thèse de doctorat. Institut agronomique, vétérinaire et forestier de France, Paris. pp 218.
- **Dominguez, H. J., Paz, B., Daranas, A. H., Norte, M., Franco, J. M., Fernández, J. J.** (2010). Dinoflagellate polyether within the yessotoxin, pectenotoxin and okadaic acid toxin groups: Characterization, analysis and human health implications. *Toxicon*. 56(2), 191-217.

- **Doré-Deschênes, F.** (2009). Utilisation des microalgues comme source d'énergie durable. Mémoire de grade de maître en environnement (M.Env.). Centre universitaire de formation en environnement, Université de Sherbrooke. Québec canada. pp 111.
- **Dote, Y., Sawayama, S., Inoue, S., Minowa, T., Yokoyama, S.** (1994). Recovery of Liquid Fuel from Hydrocarbon-Rich Microalgae by Thermochemical Liquefaction. *Fuel*. 73(12), 1855-1857.
- **Draisma, S. G., Peters, A. F., Fletcher, R. L.** (2003). Evolution and taxonomy in the Phaeophyceae: effects of the molecular age on brown algal systematics. *Out of the Past*. 87-102.
- **Dragon, G., Fernandes, B., Vicente, A.A and Tejsejra, J.A.** (2010). Third generation biofuels from microalgae. *Current Rescarch, Tcchnology and Education Topics in Applied Microbiology and Microbial Biotechnology*. 2, 1355- 1366.
- **Dumont, V.** (2006). Etude des cyanobacteries dans la riviere tarn - campagne ete 2005 - .CRT/CRITT Bio-Industries, Insatransfert – SAIC. pp 124.
- **Durai, P., Batool, M., Choi, S.** (2015). Structure and effects of cyanobacterial lipopolysaccharides. *Marine Drugs*. 13(7), 4217-4230.

E :

- **Edwards, H. I.** (1956). The etiology and epidemiology paralytic shellfish poisoning. *Journal of Milk and Food Technology*.19(12), 331-335.

F :

- **Faller, H.** (2011) .Les applications et la toxicite des algues marines .Thèse de doctorat. Université de limoges. pp 132.
- **Farabegoli, F., Blanco, L., Rodríguez, L. P., Vieites, J. M., Cabado, A. G.** (2018). Phycotoxins in marine shellfish: Origin, occurrence and effects on humans. *Marine drugs*. 16(6), 188.
- **Feldmann, J., L'Hardy-Halos, M. T.** (1977). La multiplication végétative chez les Algues: ses principaux aspects morphologiques. *Bulletin de la société botanique de France*, 124(sup1), 13-41.
- **Ferrão-Filho, A. D. S., Kozlowsky-Suzuki, B.** (2011). Cyanotoxins: bioaccumulation and effects on aquatic animals. *Marine drugs*. 9(12), 2729-2772.

- **Ferreira Lage, S.** (2016). The neurotoxin β -N-methylamino-L-alanine (BMAA): Sources, bioaccumulation and extraction procedures. Department of Ecology, Environment and Plant Sciences, Stockholm University. pp 69.
- **F & FN Spon .11 New Fetter Lane.** (1999). Toxic Cyanobacteria in Water: A guide to their public health consequences, monitoring and management. London and New York. pp 400.
- **Filali, R.** (2012). Elimination estimation et commande robustes de culture de microalgues pour la valorisation biologique de CO₂. Thèse de doctorat. Université de Paris. pp 226.
- **Frémy, J. M. Lassus, P.** (2001). Toxines d'algues dans l'alimentation. *Editions Quae*. pp 553. <https://scholar.google.com/>.

J :

- **James, K. J., Fidalgo Sáez, M. J., Furey, A., Lehane, M.** (2004). Azaspiracid poisoning, the food-borne illness associated with shellfish consumption. *Food Additives and Contaminants*. 21(9), 879–892.
- **Jean, R. N.** (2013). Étude de la matte sulfo-oxydante de la mangrove de Guadeloupe: caractérisation des micro-organismes principaux des familles Beggiatoaceae et Oscillatoriaceae. Thèse de doctorat. Antilles-Guyane. pp 183.
- **Jérémy, S.** (2005). Toxicité des cyanobactéries d'eau douce vis-à-vis des animaux domestiques et sauvages. Thèse de doctorat. Université Claude-Bernard-Lyon. pp 116.

H :

- **Haberkorn, H.** (2009). Impact du dinoflagellé toxique, *Alexandrium minutum*, sur l'huître creuse, *Crassostrea gigas*: approche intégrative. Thèse de doctorat. Université de Bretagne occidentale-Brest. pp 194.
- **Hadi, S. I. I. A., Santana, H., Brunale, P. P. M., Gomes, T. G., Oliveira, M. D., Matthiensen, A., Brasil, B. S. A. F.** (2016). DNA Barcoding Green Microalgae Isolated from Neotropical Inland Waters. *Plos One*. 11(2), e0149284.
- **Hosikian, A., Lim, S., Halim, R., Danquah, M. K.** (2010). Chlorophyll extraction from microalgae: A review on the process engineering aspects. *International journal of chemical engineering*. pp 1–11.

- **Houssou, A. M.** (2012). Variabilité saisonnière des communautés planctoniques (Phyto et zooplancton) des lacs Azili, Hlan et Toho. Mémoire de master. Université D'abomey-Calavi (UAC). pp 114.
- **Humbert, J. F.** (2009). Toxins of Cyanobacteria. *Handbook of Toxicology of Chemical Warfare Agents*. 371–379.
- **Humpage, A. R., Falconer, I. R.** (2003). Oral toxicity of the cyanobacterial toxin cylindrospermopsin in male Swiss albino mice: determination of no observed adverse effect level for deriving a drinking water guideline value. *Environmental Toxicology: An International Journal*. 18(2), 94-103.

I :

- **Itis, A.** (1980). Les algues. *Flore et Faune Aquatiques de l 'Afrique Sahélo Soudanienne*.1, 9-61.

G :

- **Gargouch, N.** (2018). Caractérisation de la microalgue rouge *Porphyridium marinum* sous différentes conditions de culture et valorisation de ces métabolites. Thèse de doctorat. Université Clermont Auvergne; Université de Sfax (Tunisie). pp 147.
- **-Garon-Lardiere, S.** 2004. Etude structurale des polysaccharides pariétaux de l'algue rouge *Asparagopsis armata* (Bonnemaisoniales). Thèse de doctorat. Université De Bretagne Occidentale. pp 332.
- **Ghaly, A. E., Dave, D., Brooks, M. S., Budge, S.** (2010). Production of biodiesel by enzymatic transesterification. *American Journal of Biochemistry and Biotechnology*. 6(2), 54-76.
- **Guzmán-Guillén, R., Prieto, A. I., Vasconcelos, V. M., Cameán, A. M.** (2013). Cyanobacterium producing cylindrospermopsin cause oxidative stress at environmentally relevant concentrations in sub-chronically exposed tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Chemosphere*. 90(3), 1184-1194.

K :

- **Kamyab, H., Chelliapan, S., Kumar, A., Rezanian, S., Talaiekhosani, A., Khademi, T., Sharma, S.** (2019). Microalgal biotechnology application towards environmental sustainability. *Application of microalgae in wastewater treatment*. 445–465.

- **Kaur, G.** (2019). Freshwater Cyanotoxins. *Biomarkers in Toxicology*. 601–613.
- **Kaushik, R., Balasubramanian, R.** (2013). Methods and approaches used for detection of cyanotoxins in environmental samples: a review. *Critical reviews in environmental science and technology*. 43(13), 1349-1383.
- **Kerbrat, A. S.** (2010). Rôle des cyanobactéries dans le développement des zones ciguatérigènes en lien avec les impacts anthropiques, pour une meilleure gestion du risque ciguatérique .Thèse de doctorat. Université Pierre et Marie Curie-Paris VI. pp 339.
- **Khan, M. I., Shin, J. H., Kim, J. D.** (2018). The promising future of microalgae: current status, challenges, and optimization of a sustainable and renewable industry for biofuels, feed, and other products. *Microbial cell factories*.17(1), 1-21.
- **Kliegman, R. M., Bonita, M.D., Stanton, F., Joseph, S.t., Geme, M.D., Nina F., Schor, M.D.** (2015) .*Nelson Textbook of Pediatrics, 2-Volume Set*
- **König, C.** (2018).Structure et reproduction des algues. Dossier > *Les algues, de surprenants végétaux aquatiques*. Futura.
- **Kottuparambil, S., Thankamony, R. L., Agusti, S.** (2019). Euglena as a potential natural source of value-added metabolites. A review. *Algal research*. 37, 154-159.
- **Kpogbemabou, D.** (2011) .Procède de fabrication de biocarburants a partir de biomasse Lignocellulosique biologiquement destructure .Thèse de doctorat. Université De poitiers ; France. pp 230.
- **Krichen, E.** (2020). Optimisation et prédiction de la production algale en polycultures, approches expérimentales et modélisation mathématique .Thèse de doctorat. Université Montpellier.pp 285.
- **Kulasooriya, S. A.** (2011). Cyanobacteria: pioneers of planet earth. *Ceylon journal of science (Bio. Sci.)*. 40(2), 71-88.

L :

- **Lahrouni, M., Oufdou, K., Oudra, B.** (2015). Occurrence of cyanobacteria producing toxins in irrigation freshwaters: which impacts on crop quality and public health?. *Journal of Materials and Environmental Science*. 6(10), 2986-3001.
- **Landsberg, J. H.** (2002). The effects of harmful algal blooms on aquatic organisms. *Reviews in fisheries science*. 10(2), 113-390.

- **Laplace-Treytore, C., Peltre, M. C., Lambert, É., Rodriguez, S., Vergon, J. P., Chauvin, C.** (2014). Guide pratique de détermination des algues macroscopiques d'eau douce et de quelques organismes hétérotrophes: Guide pratique de détermination générique des algues macroscopiques d'eau douce. France. Irstea. pp 208.
- **Latil de Ros, D.** (2017). Microalgae as a new source of chitosans. Thèse de doctorat. Université de Barcelona, Espagne. pp 264.
- **La vieille, S., Krysz, S., Aubert, P., BELIN, C.** (2004). Prévention des intoxications par les phycotoxines marines en France en 2004. *Bulletin Epidemiologique-Afssa*. (13), 3-5.
- **Lavoie, I., Laurion, I., Vincent, W.** (2007). Les fleurs d'eau de cyanobactéries, document d'information vulgarisée. pp 35
- **Lavoie, I., Laurion, I., Warren, A., Vincent, W.** (2007). Les fleurs d'eau de cyanobactéries: Revue de littérature. Université Laval. Québec. NRS rapport no 916. Xiii. pp 140.
- **Lee, R. E.** (2008). Basic characteristics of the algae. *In Phycology*. Cambridge: Cambridge University Press. New York, USA, (4ème). pp 561.
- **Legrand, B.** (2017). Caractérisation des proliférations nostocaléennes anciennes et futures via les akinètes présents dans les sédiments. Thèse de doctorat. Université Clermont Auvergne.France. pp 272
- **Lehane, L.** (2001). Paralytic shellfish poisoning: a potential public health problem. *Medical journal of Australia*.175(1), 29-31.
- **Levi, Y., Harvey, M., Cervantès, P.** (2006). Évaluation des risques liés à la présence de cyanobactéries et leurs toxines dans les eaux destinées à l'alimentation, à la baignade et autres activités récréatives (18899 Cyanos Couv tranche 13). *Afssa agence française de sécurité sanitaire et des aliments*. pp 236
- **Li-Beisson, Y., Peltier, G.** (2013). Third-generation biofuels: current and future research on microalgal lipid biotechnology. *Ocl*. 20(6), D606.
- **Lopez-Bautista, J. M.** (2000). Molecular systematics of the green algal order Trentepohliales (Chlorophyta). Thèse de doctorat. Louisiana State University and Agricultural & Mechanical College.pp 135.
- **Louzao, M. C., Vilariño, N., Vale, C., Costas, C., Cao, A., Raposo-Garcia, S. ... Botana, L. M.** (2022). Current Trends and New Challenges in Marine Phycotoxins. *Marine Drugs*. 20(3), 19

- **Lucchetti, A.** (2014). Modélisation et conception d'un système de culture de microalgues. Thèse de doctorat. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris. France. pp196.
- **Luckas, B., Krüger, T., Röder, K.** (2017). Phycotoxins and Food Safety. *Chemical Contaminants and Residues in Food*. 337–378.
- **M :**
- **Mabee, W. E., Saddler, J. N.** (2010). Bioethanol from lignocellulosics: status and perspectives in Canada. *Bioresource technology*. 101(13), 4806-4813.
- **Martínez-Ruiz, E. B., Cooper, M., Al-Zeer, M. A., Kurreck, J., Adrian, L. Szewzyk, U.** (2020). Manganese-oxidizing bacteria form multiple cylindrospermopsin transformation products with reduced human liver cell toxicity. *Science of The Total Environment*. 729, 138924
- **Masojídek, J., Torzillo, G., Koblížek, M.** (2013). Photosynthesis in Microalgae. *Handbook of Microalgal Culture*. pp 21–36.
- **Maurer, D., Bec, B., Neaud-Masson, N., Rumebe, M., Auby, I., Grémare, A.** (2010). Etude des relations entre le phytoplancton et les phénomènes de toxicité d'origine inconnue dans le Bassin d'Arcachon. pp 100.
- **Meddour, R. Misseraoui, M. A. Laaref, A. Benjedah, A.** (2020). Principales causes de la pollution toxique. Université Saad dahleb de Blida.
- **Medhioub, W.** (2011). Etude des mécanismes de contamination des mollusques bivalves par des neurotoxines à action rapide (FAT) et développement de procédés de détoxification. Thèse de doctorat. pp 211.
- **Mekebri, A., Blondina, G. J., Crane, D. B.** (2009). Method validation of microcystins in water and tissue by enhanced liquid chromatography tandem mass spectrometry. *Journal of Chromatography a*. 1216(15), 3147-3155.
- **Meneely, J. P., Chevallier, O. P., Graham, S., Greer, B., Green, B. D., Elliott, C. T.** (2016). β -methylamino-L-alanine (BMAA) is not found in the brains of patients with confirmed Alzheimer's disease. *Scientific Reports*. 6(1), 1-9.
- **Mezdour, H.** (2018). Potentiel antioxydant des algues des côtes de l'est Algérien. Thèse de doctorat. Université des Frères Mentouri, Constantine1. pp 143.
- **Miao, X., Wu, Q.** (2004). High yield bio-oil production from fast pyrolysis by metabolic controlling of *Chlorella protothecoides*. *Journal of Biotechnology*. 110 (1), 85-93.

- **Michel, G., Tonon, T., Scornet, D., Cock, J. M., Kloareg, B.** (2010). Central and storage carbon metabolism of the brown alga *Ectocarpus siliculosus*: insights into the origin and evolution of storage carbohydrates in Eukaryotes. *New Phytologist*. 188(1), pp 67-81.
- **Miles, C. O., Wilkins, A. L., Munday, R., Dines, M. H., Hawkes, A. D., Briggs, L. R., ... Towers, N. R.** (2004). Isolation of pectenotoxin-2 from *Dinophysis acuta* and its conversion to pectenotoxin-2 seco acid, and preliminary assessment of their acute toxicities. *Toxicon*. 43(1), 1-9.
- **Miyasaka, Y.** (2014). Development of an analytical method for β -methylamino-l-alanine, a cyanobacterial metabolite and potential environmental toxin and selective extraction protocol and structure of formamides of β -methylamino-l-alanine (bmaa) from *cycas thouarsii*. Mémoire de master .University of Hawaii at Manoa.
- **Moejes, F. W., Moejes, K. B.** (2017). Algae for Africa: Microalgae as a source of food feed and fuel in Kenya. *African Journal of Biotechnology*. 16(7), 288-301.
- **Molina-Grima, E., García-Camacho, F., Acién-Fernández, F. G., Sánchez-Mirón, A., Plouviez, M., Shene, C., Chisti, Y.** (2021). Pathogens and predators impacting commercial production of microalgae and cyanobacteria. *Biotechnology advances*. 107884.
- **Mollo, P. Noury, A.** (2013). Le manuel du plancton (Vol. 195), ECLM. pp 198.
- **Mondeguer, F., Baut, M. L.** (2005). Etude d'un système de filtration de l'eau de mer pour l'alimentation des bassins conchylicoles insubmersibles durant des efflorescences toxiques. Rapport de fin de contrat: Cas d'une efflorescence à *Alexandrium minutum* et à *Dinophysis* spp. pp 34.
- **Montabord, D.** (2009). Bases réglementaires de la surveillance des zones conchylicoles. *Bulletin de l'Académie vétérinaire de France*.162(3), pp 253-256.
- **Munday, R., Holland, P. T., McNabb, P., Selwood, A. I., Rhodes, L. L.** (2008). Comparative toxicity to mice of domoic acid and isodomoic acids A, B and C. *Toxicon*. 52(8), 954-956.
- **Munday, R. Reeve, J.** (2013). Risk assessment of shellfish toxins. *Toxins*. 5(11), pp 2109-2137.

N :

- **Nawaz, Z., Naveed, S. (Eds.).** (2012). Advances in chemical engineering. BoD–Books on Demand. pp 581.
- **Nelsen, D. R., Nisani, Z., Cooper, A. M., Fox, G. A., Gren, E. C. K., Corbit, A. G., Hayes, W. K.** (2013). Poisons, toxins, and venoms: redefining and classifying toxic biological secretions and the organisms that employ them. *Biological Reviews*. 89(2), pp 450–465.
- **Nemchi, F.** (2006). Modification physico-chimique de deux algues marines *Ulva lactuca* et *Cystoseira stricta* en vue de l'élimination par adsorption du bleu de méthylène. Mémoire de Magister .Université d'Oran1-Ahmed Ben Bella. pp 113.
- **Niamien-Ebrotiè, J. E.** (2010). *Composition et distribution spatiale et saisonnière des peuplements d'algues de quatre rivières du Sud-Est de la Côte d'Ivoire (Soumié, Éholié, Éhania et Noé).*Thèse de doctorat. Université NANGUI ABROGOUA (Côte d'Ivoire). pp 155.
- **Nicolas, M., Belin, C., Favre, P., Rudloff, L.** (2017). Surveillance des phycotoxines dans les coquillages. Bulletin Epidémiologique. *Santé animale et alimentation n° 77/numéro spécial-surveillance sanitaire des aliments.* (77), 23-27.
- **Niedermeyer, T. H., Daily, A., Swiatecka-Hagenbruch, M., Moscow, J. A.** (2014). Selectivity and potency of microcystin congeners against OATP1B1 and OATP1B3 expressing cancer cells. *PloS one*. 9(3), e91476.
- **Nguyen, H. P. T.** (2017). Optimisation du procédé d'hydrolyse enzymatique appliqué à l'extraction du pigment rouge, la R-phycoérythrine à partir de *Mastocarpus stellatus* et *Gracilaria gracilis* .Thèse de doctorat. Nantes. pp 211.
- **Novoveská, L., Zapata, A. K., Zabolotney, J. B., Atwood, M. C., Sundstrom, E. R.** (2016). Optimizing microalgae cultivation and wastewater treatment in large-scale offshore photobioreactors. *Algal research*. 18, 86-94.

O :

- **Ogawa, R. E., Carr, J. F.** (1969). The influence of nitrogen on heterocyst production in blue-green algae 1. *Limnology and oceanography*. 14(3), 342-351.
- **Okamoto, K., Fleming, L. E.** (2005). Algae. in *Encyclopedia of Toxicology (Second Edition)*. pp 68-76.

- **Orejuela-Escobar, L., Gualle, A., Ochoa-Herrera, V., Philippidis, G. P.** (2021). Prospects of Microalgae for Biomaterial Production and Environmental Applications at Biorefineries. *Sustainability*. 13(6), 3063.
- **Osswald, J., Rellán, S., Gago, A., Vasconcelos, V.** (2007). Toxicology and detection methods of the alkaloid neurotoxin produced by cyanobacteria, anatoxin-a. *Environment international*. 33(8), 1070-1089.
- **Oucif, H.** (2018). Valorisation des algues de la côte Ouest algérienne: potentiel antioxydant et hormonal. Thèse de doctorat. Oran. pp 224.

P :

- **Patel, A., Matsakas, L., Rova, U., Christakopoulos, P.** (2019). A perspective on biotechnological applications of thermophilic microalgae and cyanobacteria. *Bioresource Technology*. 278, 424-434.
- **Paz, B., Daranas, A. H., Norte, M., Riobó, P., Franco, J. M., Fernández, J. J.** (2008). Yessotoxins, a group of marine polyether toxins: an overview. *Marine Drugs*. 6(2), 73-102.
- **Perez, E.** (2015). Analyses biochimiques, protéomiques et transcriptomiques du métabolisme énergétique chez l'algue secondaire verte *Euglena gracilis* (Euglenozoa, Excavata). Thèse de doctorat. Université de Liège, Liège, Belgique. pp 89.
- **Perez, R., Liu, L., Lopez, J., An, T., Rein, K. S.** (2008). Diverse bacterial PKS sequences derived from okadaic acid-producing dinoflagellates. *Marine drugs*. 6(2), 164-179.
- **Pierre, G.** (2010). Caractérisation biochimique d'exopolymères d'origine algale du bassin de Marennes-Oléron et étude des propriétés physico-chimiques de surface de micro-organismes impliquées dans leur adhésion .Thèse de doctorat. Université de La Rochelle. pp 323.
- **Plancke, C.** (2008). Etude du métabolisme de l'amidon chez les Archaeplastida: le cas de l'algue glaucophyte modèle unicellulaire *Cyanophora paradoxa* et de l'algue rouge multicellulaire *Chondrus crispus*. Thèse de doctorat. Université des Sciences et Technologies de Lille. pp 161.
- **Plumley, F. G.** (1997). Marine algal toxins: biochemistry, genetics, and molecular biology. *Limnology and Oceanography*. 42(5part2), 1252-1264.

- **Pulido, O. M.** (2016). Phycotoxins by harmful algal blooms (HABS) and human poisoning: an overview. *International Clinical Pathology Journal*. 2(6), 00062.

Q :

- **Quiblier, C., Amzil, Z., Baurès, E., Banas, D., Biré, R., Fessard, V., ... Welté, B.** (2020). Evaluation des risques liés aux cyanobactéries et leurs toxines dans les eaux douces. Avis de l'Anses. Rapport d'expertise collective. Édition scientifique. pp 495.

R :

- **Ramsdell, J. S.** (2008). 13 The Molecular and Integrative Basis to Domoic Acid Toxicity. *Phycotoxins: Chemistry and biochemistry*. pp 223.
- **Rastoin, J. L.** (2016). Le secteur des micro-algues en Méditerranée. *IPEMED. études et analyses*. pp 94.
- **Reizopoulou, S., Stroglyoudi, E., Giannakourou, A., Pagou, K., Hatzianestis, I., Pyrgaki, C., Granéli, E.** (2008). Okadaic acid accumulation in macrofilter feeders subjected to natural blooms of *Dinophysis acuminata*. *Harmful Algae*. 7(2), 228–234.
- **Reynaud, P. A., Roger, P. A.** (1981). Variations saisonnières de la flore algale et de l'activité fixatrice d'azote dans un sol engorgé de bas de dune. *Rev. Ecol. Biol. Sol.*18(1), 9-27.
- **Reynolds, C. S.** (1984). The ecology of freshwater phytoplankton. Cambridge university press. pp 384.
- **Rippka, R.** (1988). [2] Recognition and identification of cyanobacteria. Academic Press. In *Methods in enzymology* (167), 28-67.
- **Robillot, C., Llewellyn, L.E.** (2005). Water Analysis Algal and Microbial Toxins .in *Encyclopedia of Analytical Science (Second Edition)*.
- **Roger, P., François, M.** (2004). La photosynthèse : généralités. L'université Pierre et Marie Curie, paris.

S :

- **Saldarriaga, J. F., Cavalier-Smith, T., Menden-Deuer, S., Keeling, P. J.** (2004). Molecular data and the evolutionary history of dinoflagellates. *European journal of protistology*. 40(1), 85-111.

- **Salzman, M., Madsen, J. M., Greenberg, M. I.** (2006). Toxins: Bacterial and marine toxins. *Clinics in laboratory medicine*. 26(2), 397-419.
- **Seckbach, J. (Ed.).** (2007). Algae and cyanobacteria in extreme environments (Vol. 11). Springer science & business media. pp 811.
- **Sennour, K.** (2016). Inventaire des microalgues d'un écosystème humide de l'Algerie occidentale (cas d'Oglet Ed Daira wilaya de Naama). Thèse de magister. pp 132.
- **Seymour, B., Andreosso, A., Seymour, J.,** (2015). Cardiovascular Toxicity from Marine Envenomation. *Heart and Toxins*. 203–223.
- **Sharma, A., Gautam, S., Kumar, S.** (2014). Phycotoxins. *Encyclopedia of Food Microbiology (Second Edition)*. pp 25–29.
- **Sharma, O. P.** (1986). *Textbook of algae*. Tata McGraw-Hill Education. pp 396
- **Sheath, R. G.** (2003). Red Algae. *Freshwater Algae of North America*. pp 197–224.
- **Svirčev, Z., Baltić, V., Gantar, M., Juković, M., Stojanović, D., Baltić, M.** (2010). Molecular aspects of microcystin-induced hepatotoxicity and hepatocarcinogenesis. *Journal of Environmental Science and Health Part C*. 28(1), 39-59.
- **Sialve, B., Steyer, J. P.** (2013). Les microalgues, promesses et défis. *Innovations Agronomiques*, INRAE, 26, 25-39.
- **Simmons, M. A.** (2007). Saxitoxin. in xPharm: The Comprehensive Pharmacology Reference. pp 1-3
- **Singh, J., Pathak, R. K.** (2010). Toxicological assessment of cyanobacterial toxins. *Bioscan*. 5(4), 523-530.
- **Sivonen, K.** (2009). Cyanobacterial toxins. *Encyclopedia of microbiology*. pp 290-307.
- **Solter, P. F., Beasley, V. R.** (2002). In Handbook of Toxicologic Pathology (Second Edition). Academic press. 1, 631-643.
- **Solter, P. F., Beasley, V. R.** (2013). Phycotoxins. *In Haschek and Rousseaux's handbook of toxicologic pathology*. Academic Press. pp 1155-1186.
- **Stanier, R. Y., Bazine, G. C.** (1977). Phototrophic prokaryotes: the cyanobacteria. *annual review of microbiology*. 31(1), 225–274.
- **Steffoff, R.** (2006). The flowering plant division. Marshall cavendish. pp 96.
<https://scholar.google.com/>.

- **Stephens, E., Ross, I. L., Mussnug, J. H., Wagner, L. D., Borowitzka, M. A., Posten, C., Hankamer, B.** (2010). Future prospects of microalgal biofuel production systems. *Trends in plant science*, 15(10), 554-564.
- **Souissi, M., Chaibi, R., Melizi, M., Bouallag, C., Bensouilah, M.** (2004). Les cyanobactéries d'un plan d'eau douce (le lac Oubeira –El Kala). Inventaire et répartition spatiale. Université Badji Mokhtar Annaba. *Sciences & technologie. C, biotechnologies*. 38-42.
- **Suarez-Isla, B. A.** (2015). Saxitoxin and other paralytic toxins: Toxicological profile. *Mar. Freshw. Toxins*. pp 1-16.
- **Suty, L.** (2015). Les végétaux: des symbioses pour mieux vivre. *Editions Quae*. pp 56.

T :

- **Tebbani, S., Filali, R., Dumur, D., Lopes, F., Pareau, D.** (2014). Biofixation de CO₂ par les microalgues: modélisation, estimation et commande. ISTE Group. pp 155.
- **Tsukamoto, J., Durán, N., Tasic, L.** (2013). Nanocellulose and bioethanol production from orange waste using isolated microorganisms. *Journal of the Brazilian Chemical Society*. 24, 1537-1543.

V :

- **Vale, M. A., Ferreira, A., Pires, J. C. M., Gonçalves, A. L.** (2020). CO₂ capture using microalgae. *Advances in Carbon Capture*. pp 381–405.
- **Van der Merwe, D.** (2014). Freshwater cyanotoxins. *Biomarkers in Toxicology*. pp 539–548.
- **Van der Merwe, D.** (2015). Cyanobacterial (Blue-Green Algae) Toxins. *Handbook of Toxicology of Chemical Warfare Agents*. pp 421–429.
- **Van der Valk, A.** (2012). The biology of freshwater wetlands. Oxford University Press. pp 279.
- **Velea, S., Oancea, F., Fischer, F.** (2017). Heterotrophic and mixotrophic microalgae cultivation. *Microalgae-based biofuels and bioproducts*. pp 45–65.
- **Vidal, L., Ballot, A., Azevedo, S., Padisák, J., Welker, M.** (2021). Introduction to cyanobacteria. Toxic cyanobacteria in water. *2nd ed.*; Chorus, I., Welker, M., Eds. pp 163-211.

- **Villay, A.** (2013). Production en photobioréacteurs et caractérisation structurale d'un exopolysaccharide produit par une microalgue rouge, *Rhodella violacea*: application à l'obtention d'actifs antiparasitaires. Thèse de doctorat. Université Blaise Pascal, Clermont, Ferrand II. pp 200.
- **Visciano, P., Schirone, M., Berti, M., Milandri, A., Tofalo, R., Suzzi, G.** (2016). Marine Biotoxins: Occurrence. *Toxicity, Regulatory Limits and Reference Methods. Frontiers in Microbiology. 7.*
- **Voloshin, R. A., Kreslavski, V. D., Zharmukhamedov, S. K., Bedbenov, V. S., Ramakrishna, S., Allakhverdiev, S. I.** (2015). Photoelectrochemical cells based on photosynthetic systems: a review. *Biofuel Research Journal. 2(2), 227-235.*
- **Vonarx, J.** (2008). Cyanobactéries et cyanotoxines. planet-vie.
- **Vu, C. H. T., Lee, H. G., Chang, Y. K., Oh, H. M.** (2018). Axenic cultures for microalgal biotechnology: establishment, assessment, maintenance, and applications. *Biotechnology advances.36 (2), 380-396.*

W :

- **Wang, F., Gao, B., Dai, C., Su, M., Zhang, C.** (2020). Comprehensive utilization of the filamentous oleaginous microalga *Tribonema utriculosum* for the production of lipids and chrysolaminarin in a biorefinery concept. *Algal Research. 50, 101973.*
- **Wiese, M., D'agostino, P. M., Mihali, T. K., Moffitt, M. C., Neilan, B. A.** (2010). Neurotoxic alkaloids: saxitoxin and its analogs. *Marine drugs. 8(7), 2185-2211*
- **Windust, A. J., Wright, J. L., McLachlan, J. L.** (1996). The effects of the diarrhetic shellfish poisoning toxins, okadaic acid and dinophysistoxin-1, on the growth of microalgae. *Marine biology. 126(1), 19-25.*
- **Wolff, A.** (2015). L'utilisation des microalgues pour la fabrication de biocarburants : analyse de la chaîne de valeur - contexte français et international. pp 62.
- - Google Books
- **Wu, X., Hou, L., Lin, X., Xie, Z.** (2019). Application of Novel Nanomaterials for Chemo- and Biosensing of Algal Toxins in Shellfish and Water. *Novel Nanomaterials for Biomedical, Environmental and Energy Applications. 353-414.*

Y :

- **Yasumoto T., Oshima Y., Yamaguchi M.** (1978). Occurrence of a new type of shellfish poisoning in the Tohoku. District. Bull. Jpn. Soc. Sci. Fish. 44 (11), 1249-1255.
- **Yoon, H. S., Muller, K. M., Sheath, R. G., Ott, F. D., Bhattacharya, D.** (2006). Defining the major lineages of red algae (Rhodophyta)1. *Journal of Phycology*. 42(2), 482–492.

Z :

- **Zakryś, B. E., Milanowski, R., Empel, J., Borsuk, P., Gromadka, R., Kwiatowski, J.** (2002). Two different species of Euglena, *E. Geniculata* and *E. Myxocylindracea* (Euglenophyceae), are virtually genetically and morphologically Identical 1. *Journal of phycology*. 38(6), pp 1190-1199.
- **Zanchett, G., Oliveira-Filho, E. C.** (2013). Cyanobacteria and cyanotoxins: from impacts on aquatic ecosystems and human health to anticarcinogenic effects. *Toxins*. 5(10), 1896-1917.
- **Zitouni, H.** (2015). Valorisation nutritionnelle d'algues marines du littoral Algérien chez le ruminant via des méthodes chimiques, biologiques et moléculaires. Thèse de doctorat. Université des Frères Mentouri, Constantine. pp 196.

Le thème : Les toxines des algues microscopiques et des cyanobactéries

Nom et prénom : Atallah Dounia/Adjeroudi Khouloud/Kadeche Rima

Résumé

Le phytoplancton (plancton végétal) est constitué essentiellement d'algues microscopiques et des cyanobactéries. Ces derniers sont des microorganismes photosynthétiques oxygéniques avec une variation dans les caractéristiques morphologiques, le mode nutritionnelle, la reproduction, l'organisation cellulaire, la structure des plastes et l'habitat. Les algues microscopiques y compris les cyanobacteries occupent la plupart des habitats. Ces microorganismes photosynthétiques sont connus pour produire une large gamme de métabolites secondaires ayant une d'importance biotechnologique, biomédicale et industrielle. Certaines espèces de cyanobacteries produisent également des toxines appelées cyanotoxines. Parmi les milliers d'espèces d'algues microscopiques, une trentaine produit des substances toxiques pour l'homme, nommés phycotoxines. La propagation à l'homme se fait via la consommation de produits de la pêche (coquillages, poissons). La prévalence d'espèces productrices de toxines est irrégulière et liée à des variables environnementales reste non définies. Notre étude consiste à étudier connaître les principales communautés d'algues microscopiques y compris les cyanobactéries et leurs toxines.

Mots clés : Algues microscopiques, biodiversité, cyanobactéries, cyanotoxines, phycotoxines,

Abstract

Phytoplankton (plant plankton) consists mainly of microscopic algae and cyanobacteria. The latter are oxygenic photosynthetic microorganisms with a variation in morphological characteristics, nutritional mode, reproduction, cell organization, plaster structure and habitat. Microscopic algae including cyanobacteria occupy most habitats. These photosynthetic microorganisms are known to produce a wide range of secondary metabolites of biotechnology, biomedical and industrial importance. Some species of cyanobacteria also produce toxins called cyanotoxins. Of the thousands of microscopic algae species, some 30 produce substances toxic to humans, called phycotoxins. The spread to humans is through the consumption of fishery products (shellfish, fish). The prevalence of toxin-producing species is irregular and related to environmental variables remain undefined. Our study consists in studying to know the main communities of microscopic algae including cyanobacteria and their toxins.

Keywords: Microscopic algae, biodiversity, cyanobacteria, cyanotoxins, phycotoxins,

