

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد الصديق بن يحي -جيجل

Faculté des Sciences de la Nature et de la vie

Département : Microbiologie Appliquée et

Sciences Alimentaires



كلية علوم الطبيعة و الحياة

قسم الميكروبيولوجيا التطبيقية

وعلوم التغذية

Mémoire de Master

Filière : Sciences Biologiques

Option: Microbiologie Appliquée

Thème

**Adaptation des microalgues aux métaux lourds : techniques
de culture et procédés de bioremédiation.**

Membres de Jury :

Présidente : Dr. Ouled Haddar H.

Examineur : Dr. Laib E.

Encadreur: Mme. Benhamada O.

Présenté par :

Aries Fatma Zohra

Mellit Assia

Labiad Hind

Année Universitaire 2019-2020

Numéro d'ordre (bibliothèque) :

Remerciements

On remercie Allah Le tout Puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

*Nous tenons à exprimer toute nos reconnaissances à notre directrice de mémoire, **Benhamada Wahiba**. Pour ses précieux conseils et son assistance tout au long de la période de travail.*

*Nous exprimons nos chaleureux remerciements à : **Dr Ouled Haddar H.** pour l'honneur qu'elle nous a fait en présidant ce jury.*

*Nous Nous remercions sincèrement : **Dr Laib S.** pour avoir accepté d'examiner notre travail.*

Nous adressons aussi nos remerciements à tous les enseignants de notre département.

Nos très chers parents, nos familles et nos amis pour leur soutien constant et leurs encouragements.

A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce travail soit possible, nous vous disons merci.

Dédicace

Je dédie ce travail à :

Mes chers parents

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous.

Ce travail est le fruit de vos sacrifices que vous avez fait consentis pour ma formation, je ne saurais exprimer ma gratitude seulement par des mots que dieu vous protège et vous garde pour nous. Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de vous.

A mes frères et mes sœurs qui ma aider beaucoup

A ma binôme assia et hind et tous mes chères amies.

*A la promotion de MASTER 2 microbiologie appliquée
l'année 2019/2020.*

Aries fatma zohra

Dédicace :

*Je dédie ce modeste travail accompagné d'un profond amour à:
Mes chers parents : Pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur
tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de ma vie et
mes études, Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de
l'amour Dont ils ne cessent de me combler. Que dieu leur procure
bonne santé et longue vie.*

Mes chères sœurs :

*Celui qui les aiment beaucoup et qui sont toujours là pour moi.
que Allah les protège et leurs offre la chance et le bonheur*

*Toute ma grande famille : Et surtout mon grand-père et ma
grand-mère qui m'encouragent toujours et prient pour mon bien
et pour ma réussite.*

Mes chères amies :

*Qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient toujours à mes
côtés, et qui m'ont accompagné durant mon chemin d'études, mes
aimables amis, collègues d'étude, et sœurs de cœur, toi Samia,
Marwa, Faten, Nihad, Hind, Bessma, Sara et Meryem.*

*Mes proches irremplaçables et indispensables dans ma vie ceux
que j'aime beaucoup et qui m'ont soutenu tout au long de ce
travail.*

A ma binômes Hind et Fatma Zohra et à tous mes collègues.

Mellit Assia

Dédicaces

A

Mes très chers parents.

En témoignage de mon profond amour et mon plus grand respect. Je ne vous remercierai jamais assez pour votre soutien tout au long de ma scolarité, pour tous vos sacrifices.

A ma chère sœur qui est vivante fatima.

A ma chère sœur, que j'ai recouverte de terre noire, que votre demeure soit au paradis, si dieu le veut mon petit selma.

A ma binôme assia et fatima et tous mes chères amies

Labiad Hind

Sommaire

Sommaire

Liste des figures.....	IV
Introduction	1
Chapitre I : Généralité sur les microalgues	
I.1. Définition	3
I.1.2. Microalgues.....	3
I.2. Classification et caractérisation des microalgues	4
I.2.1. Prochlorophyta	4
I.2.2. Les eucaryotes	4
I.2.2.1. Bacillariophyta (Ochromyza).....	4
I.2.2.2. Dinophyta (Dinoflagellées).....	4
I.2.2.3. Rhodophyta (microalgues rouges)	5
I.2.2.4. Chlorophyta.....	5
I.2.2.5. Charophyta.....	5
I.2.2.6. Cercozoa	5
I.2.2.7. Cryptophyta.....	6
I.2.2.8. Picozoa.....	6
I.2.2.5. Euglenophyta (Euglenozoa).....	6
I.2.2.7. Eustigmatophyta (Haptophycées)	6
I.4. Applications des microalgues.....	7
I.4.1. Alimentation humaine.....	7
I.4.2. Application pharmaceutique et cosmétique.....	7
I.4.3. Alimentation des animaux.....	7
I.4.4. Application dans l'agriculture	8
I.4.5. Utilisation comme engrais.....	8
I.4.6. Production d'énergie	8
I.4.7. Production de biodiesel	8
I.4.8. Production de biocarburant.....	9

Chapitre II : Généralité sur les métaux lourds

II.1. Définition des métaux lourds	10
II.2. Oligo-éléments	10
II.3. Classification des métaux lourds	10
II.3.1. Métaux lourds essentiels	10
II.3.2. Métaux lourds non essentiels	10
II.4. Source des métaux lourds.....	11
II.4.1. Sources naturelles.....	11
II.4.2. Sources anthropiques.....	11
II.5. Pollution du milieu aquatique par les métaux lourds.....	11
II.6. Comment les métaux lourds entre dans les écosystèmes aquatiques ?.....	12
II.7. Effet des métaux lourds sur les différents organismes	12
II.7.1. Mécanisme de toxicité des métaux lourds.....	12
II.8. Exemple de métaux lourds: Mercure	13

Chapitre III : La culture des microalgues

III.1. But de la culture des microalgues.....	14
III.1. Différents systèmes de culture des microalgues.....	15
III.1.1. Système ouvert	15
III.1.1.1. Système ouvert sans agitation (non remué)	15
III.1.1.2. Étangs de raceway	15
III.1.1.3. Étangs circulaires	16
III.2. Système fermé	17
III.2.1. Photobioréacteurs	17
III.3. Paramètres influencent la culture des microalgues	19
III.3.1. Lumière.....	19
III.3.2. Dioxyde de carbone (CO ₂)	19
III.3.3. Température	19
III.3.4. pH	20

III.3.5. Nutriments.....	20
III.4. Effets toxiques des métaux lourds sur les microalgues	20
III.4.1. Effets toxiques sur la culture.....	21
III.4.2. Effets sur la photosynthèse	21
III.5. Elimination des métaux lourds par les microalgues.....	22
III.5.1 Adsorption.....	22
III.5.1.1. Bioaccumulation.....	22
III.5.1.2. Biosorption.....	23
III.6. Facteurs influençant l'élimination des métaux lourds par les microalgues.....	25
III.6.1. pH.....	25
III.6.2. Concentration de biomasse.....	25
III.6.3. Température.....	26
III.6.4. Temps de contact.....	26
III.6.5. La concentration de métal.....	26
Conclusion	27
Références bibliographiques.....	29

Liste de figures

Liste des figures

Figure N° 01 : Photo des différentes formes des microalgues.....	3
Figure N° 02 : Photo d'un étangs non remués.....	15
Figure N° 03 : Photo d'un étangs de raceway.....	16
Figure N° 04 : photo d'un étang circulaire.....	16
Figure N° 05: Photo d'un photobioréacteur plan.....	17
Figure N° 06 : Photo de Photobioréacteurs tubulaires a) horizontaux; b) enroulés.....	18
Figure N° 07: Diagramme schématique du bioréacteur vertical: A) Réacteur à colonne à bulles B) Réacteur à colonne à air-lift	18
Figure N° 08 : Présentation schématique des étapes de la bioaccumulation des ions métalliques ...	23
Figure N° 09: Présentation schématique de la biosorption des ions métalliques toxiques par une cellule d'algue.....	23
Figure N° 10: Une représentation schématique des mécanismes impliqués dans la bio sorption des ions métalliques potentiellement toxiques.....	25

Introduction

L'eau est l'une des ressources naturelles les plus essentielles, mais l'altération de sa qualité et de sa nature rend son utilisation dangereuse et (ou) perturbe l'écosystème aquatique. Elle peut concerner les eaux superficielles et les eaux souterraines [1].

Chaque jour, les processus industriels génèrent de grandes quantités d'eau contaminée, qui sont rejetées dans l'environnement. Dans la plupart de cas, la pollution des eaux est due aux métaux lourds tels que le cuivre, le chrome, le nickel, le fer, le cadmium, l'arsenic et le plomb en raison de leur non-biodégradabilité et de leurs caractéristiques dangereuses [2, 3].

Différentes méthodes conventionnelles telles que la précipitation chimique, la filtration, l'oxydation et la réduction chimiques, l'osmose inverse, les techniques d'évaporation et les méthodes électrochimiques sont généralement recommandées pour l'élimination des métaux lourds de l'environnement. Cependant, ces méthodes sont rentables mais génèrent une variété de polluants secondaires [4]. L'élimination incomplète des éléments potentiellement toxiques est un autre facteur impliqué dans les processus physicochimiques. Ces éléments potentiellement toxiques peuvent être éliminés des eaux polluées par biosorption à partir d'algues, qui est une méthode efficace, sûre et plus économique [5].

Les algues sont un groupe diversifié d'organismes photosynthétiques allant des formes unicellulaires (microalgues) aux formes multicellulaires (macroalgues) habitant les environnements d'eau douce et marins. En raison de leurs caractéristiques intrinsèques variables, les algues sont utilisées dans une variété de processus industriels comme un aliment frais, des engrais, la production des biogaz, et dans le traitement des eaux usées [6].

L'utilisation de la biomasse microalgale est une technologie intéressante pour l'élimination des métaux lourds des solutions aqueuses en raison de sa grande capacité de liaison aux métaux [7].

De nombreux phénomènes biologiques ont été explorés pour leur potentiel de la bioélimination des métaux lourds mais deux ont fait l'objet d'une attention notable: la biosorption et la bioaccumulation. Ces phénomènes servent de « plates-formes » qui peuvent être manipulées pour éliminer ces éléments toxiques [8]. Les microalgues ont développé un large éventail de mécanismes (extracellulaires et intracellulaires) pour faire face à la toxicité des métaux lourds. Leur présence à grande échelle ainsi que leur capacité à croître et à concentrer les métaux lourds, L'absorption de métaux lourds par les microalgues est réputée supérieure aux processus physico-chimiques prévalents employés dans l'élimination des métaux lourds toxiques. Afin d'évaluer leur potentiel et de combler les lacunes, il est essentiel d'effectuer une évaluation critique des technologies microalgales existantes et de prendre conscience de la

nécessité de développer des technologies commercialement viables impliquant des approches stratégiques multidisciplinaires [9].

Notre étude avait pour objectifs d'étudier le mécanisme de réponse physiologique des microalgues dans des conditions de stress intense, pour explorer le mécanisme de résistance et les stratégies d'adaptation aux métaux lourds, et donc de fournir une référence pour une meilleure utilisation dans le traitement des eaux usées et l'élimination des métaux lourds.

Pour ce faire, notre recherche bibliographique est organisée en trois chapitres, le premier est focalisé sur quelques notions générales sur les microalgues, leurs caractéristiques et les applications biotechnologiques des microalgues. Le deuxième chapitre donne un aperçu général sur les métaux lourds dans les différents écosystèmes et surtout les systèmes aquatiques. Le troisième chapitre inclut les méthodes de culture des microalgues et les effets des métaux lourds sur ces derniers et aussi les mécanismes d'adaptation des microalgues aux métaux lourds

Chapitre I
Généralités sur les
microalgues

I.1. Définition

Les algues, une forme multicellulaire ou unicellulaire d'organismes vivants, peuvent être divisées en macro ou microalgues en fonction de leur taille [10].

I.1.2. Microalgues

Les microalgues (Figure 01) sont l'une des premières formes de vie sur terre. Lorsque l'environnement terrestre s'est formé il y a plus de 3 milliards d'années, des microalgues existaient dans les océans de la Terre. Il existe plus de 50 000 types différents d'espèces de microalgues présents dans les océans et l'eau douce (lacs, étangs et rivières); parmi ces espèces, seulement 30 000 ont été étudiées [11]. Les microalgues peuvent convertir l'énergie solaire en énergie chimique en fixant le CO₂ grâce à la photosynthèse, et leur efficacité est dix fois supérieure à celle des plantes terrestres [12]. Les microalgues sont constituées de cyanobactéries procaryotes et d'algues eucaryotes [13]. Elles représentent la majorité du plancton marin et produisent l'essentiel de l'oxygène atmosphérique [14].

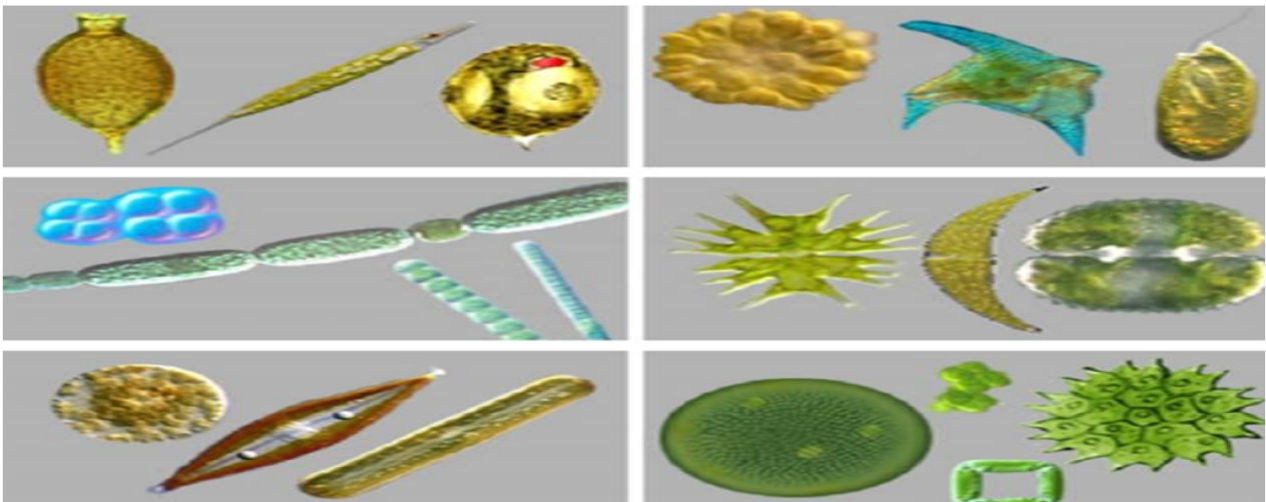


Figure 01: Photo des différentes formes des microalgues [15].

I.2. Classification et caractérisation des microalgues

La classification des microalgues en divisions est basé sur diverses propriétés telles que la pigmentation [11], la nature chimique de produit de stockage photosynthétique, l'organisation des membranes photosynthétiques et autres caractéristiques morphologiques [16].

I.2.1. Procaryotes

I.2.1.1. Cyanophyta :(Les cyanobactéries)

Les cyanobactéries sont des procaryotes photosynthétiques. Bien qu'elles soient souvent appelées algues bleu-vert, elles n'ont aucun lien direct avec les algues supérieures. Elles sont l'un des plus anciens organismes sur terre avec des archives fossiles datant de 3, 5 milliards d'années [17]. Dont la principale espèce cultivée est *Spirulina*. La photosynthèse se produit directement dans le cytoplasme. Elles seraient à l'origine des chloroplastes des cellules eucaryotes [18].

I.2.1.2. Prochlorophyta

Prochlorophyta, ou freeliving chloroplastes, sont une autre collection de cyanobactéries qui représentent un groupe artificiel en fonction de leur pigmentation différente, qui dérive d'une absence de phycobiliprotéines, et dans la plupart des cas, la présence de chlorophylles a et b [19].

I.2.2. Eucaryotes

Les microalgues eucaryotes sont des organismes uni ou pluricellulaires qui présentent une structure complexe contenant un noyau [20].

Différentes microalgues eucaryotes ont été identifiées et placées dans divers groupes, et sont principalement reconnues par le pigment [21].

I.2.2.1. Bacillariophyta (Ochrophyta)

Les diatomées sont des algues unicellulaires non flagellées entourées d'un exosquelette siliceux caractéristique appelé frustule. Cette classe d'algues présente l'une des plus grandes richesses en espèces de phytoplancton avec environ 14 000 espèces. Elles peuvent présenter dans les habitats marins, d'eau douce et (semi) terrestres du monde entier, et contribue à la production primaire et au cycle biogéochimique du carbone et des nutriments [22].

I.2.2.2. Dinophyta(Dinoflagellées)

C'est une vaste famille de microalgues comprenant 550 genres et 4 000 espèces [23]. Ce sont des microalgues alvéolaires eucaryotes unicellulaires et certaines espèces ont des caractères procaryotes et eucaryotes, dont *Amphidinium* et *Symbiodinium* sont les plus connues [24].

I.2.2.3. Rhodophyta (microalgues rouges)

Ce sont des organismes en la majorité sont macroscopiques colorés en rouge. Seules quelques espèces sont unicellulaires. Parmi celles-ci *Porphyridium purpureum* (anciennement *cruentum*) possède une forte potentialité pour la production d'acide eicosapentaénoïque [23]. Ils ont la phycoérythrine et la phycocyanine, qui peuvent masquer la chlorophylle a. Ce groupe ne présente pas de chlorophylles accessoires, bien que les algues rouges produisent un large éventail de carotènes et les pigments de xanthophylle récoltant la lumière [24].

I.2.2.4. Chlorophyta

Chlorophyta est une classe d'algues vertes uni ou multicellulaires riche en espèces avec une remarquable morphologie et une diversité écologique importante [25]. Ces microalgues contiennent de la chlorophylle-a et -b, ainsi qu'une suite de caroténoïdes, dont *-B* carotène et différentes xanthophylles [26].

I.2.2.5. Charophyta

Les algues charophytes sont les plus proches parents des plantes terrestres et englobent les unicellulaires et les multicellulaires. La plupart des innovations présentes dans les plantes terrestres ont leurs racines dans la biologie cellulaire et développementale des algues charophytes [27]. Les algues vertes charophytes sont un assemblage paraphylétique diversifié d'algues strictement d'eau douce comprenant environ 100 genres. On peut distinguer les " charophytes avancés " (*Zygnematophyceae*, *Coleochaetophyceae*, *Charophyceae*) et les " charophytes basaux " (*Klebsormidiophyceae*, *Chlorokybophriesyceae*). Cependant, les algues vertes charophytes ne se limitent pas aux habitats aquatiques [28].

I.2.2.6. Cercozoa

Les cercozoaires sont maintenant reconnus comme des flagellés hétérotrophes biciliés ancestraux qui glissent généralement sur le cil postérieur et ont une propension marquée à former des filoses pseudopodes (filopodes) pour aider à attraper ou à ingérer des proies (par exemple, les thaumatomonades), certains sont devenus des amibes fileuses en perdant les deux cils. Les cercozoaires comprennent désormais deux sous-phylums Reticulofilosa divergeant précoce (classes *Chlorarachnea*, *Granofilosea*, *Skiomonadea*) et *Monadofilosa* évoluant plus tard (classes *Metromonadea*, *Helkesea*, *Sarcomonadea*, *Imbricatea*, *Thecofilosea*) [29].

I.2.2.7. Cryptophyta

Les algues cryptophytes sont un groupe évolutif qui habite les environnements marins, saumâtres et d'eau douce. Les cryptophytes ont une forte adaptabilité à la lumière et à la température. Les phototrophes des cryptophytes contiennent des plastes avec chlorophylle a et c, ainsi que des phycobilines, comme accessoire pigments [30].

I.2.2.8. Picozoa

Un groupe d'eucaryotes non cultivés dévoilé à l'aide d'outils moléculaires, a été prétendu représenter une lignée d'algues ramifier précoce non reconnue avec un nucléomorphe (noyau résiduel d'un endosymbionte d'algue secondaire) dans leurs plastes [31]. Les « picobiliphytes anciennement » étaient de taille nanoplanctonique plutôt que picoplanctonique. Ils sont conclus dans les eaux de surface tropicales influencées par les tourbillons et dans d'autres océans, les « biliphytes » représentaient environ 30% de la biomasse phytoplanctoniques [32].

I.2.2.9. Euglenophyta (Euglenozoa)

Euglenophyta sont des cellules unicellulaires, flagellées émergées d'une seconde endosymbiose entre les algues et un hôte semblable à un protozoaire [19].

I.2.2.10. Primmésiophyta (Haptophycées)

Ces microorganismes sont caractérisés par la présence d'un appendice nommé haptomène entre deux flagelles lisses. Ces flagelles contiennent des microtubules, dont la taille est variée selon l'espèce. Les flagelles assurent le déplacement et la capture la matière organique présente dans leurs environnements [333].

I.2.2.11. Eustigmatophyta

Les microorganismes de ce groupe se caractérisent par la couleur vert-jaunâtre due à leur composition spécifique en pigments. En effet, les microalgues de ce groupe contiennent la chlorophylle a sans la chlorophylle b et c [34].

I.4. Applications des microalgues

I.4.1. Alimentation humaine

Les microalgues peuvent être considérées comme une des sources fiables de nutriments et d'autres substances de valeur pouvant satisfaire le besoin croissant en aliment et en énergie [35]. Les microalgues sont de riches sources de glucides, de protéines et de lipides. Elles ont été utilisées comme source de nutriments pour les humains en Chine, au Japon, en Afrique et au Mexique en raison de leur composition abondante en protéines (jusqu'à 70% du poids sec), vitamines et les acides gras essentiels. Jusqu'à aujourd'hui, *Chlorella* et *Spirulina* sont été les microalgues alimentaires les plus vendues, car elles peuvent pousser plus rapidement. Néanmoins, la biomasse obtenue à partir de la spiruline est principalement utilisé pour l'extraction de la phycocyanine. La microalgue *Chlorella* peut être également utilisée comme additif alimentaire en raison des actions d'ajustement du goût et de la saveur de son colorant [36]. Au Mexique, *Spirulina* est collectée dans le Texcoco et elle est utilisé pour faire du gâteau sec appelé « tecuitlatl ». Au Tchad, la spiruline est récoltée dans le lac alcalin Kossorom pour la préparation de tourteaux secs appelés « dihe » [37]. Le l'astaxanthine caroténoïde, obtenue à partir d'algues *Haematococcus*, a été approuvé au Canada comme colorant dans les aliments [36].

I.4.2. Application pharmaceutique et cosmétique

Les algues sont de riches sources en composés biologiquement actifs particuliers, y compris des métabolites primaires et secondaires. Divers produits pharmaceutiques à base de microalgues ont une valeur élevée, mais leur commercialisation en est encore limitée, mais dans un avenir proche, elle peut être considérée comme une passerelle vers une industrie de plusieurs milliards de dollars pour la production des médicaments et des compléments alimentaires à base des microalgues.

Les cyanobactéries *Arthrospira* et *Chlorella* sont des acteurs bien établis sur le marché des soins de la peau. Comme pour entreprises LVMH (Moët HENESSY LOUIS VUITTON) en France, Daniel Jouvance et Carnac, ou utilisent les extraits de microalgues pour la production de divers cosmétiques tels que la crème anti-âge, les produits de soins rajeunissants, les protecteurs solaires et les produits de soins capillaires [38].

I.4.3. Alimentation des animaux

En plus de l'utilisation des microalgues en nutrition humaine, elles peuvent être incorporées dans l'alimentation animal. Les microalgues ont été utilisé comme matière première pour les animaux allant du poisson aux animaux de ferme. Environ 30% de la biomasse d'algues produite dans le monde entier est vendu comme aliment pour animaux comme les larves de crustacés et de mollusques. Les espèces de microalgues les plus couramment utilisées pour l'alimentation animale comprennent *Chlorella*, *Isochrysis*, *Phaeodactylum*, *Chaetoceros*, *Nannochloropsis*, *Tetraselmis*, *Dunaliella*, *Scenedesmus*, *Thalassiosira* et *Skeletonema* [36].

Chapitre I: Généralités sur les microalgues

Elles étaient utilisées autrefois de façon traditionnelle dans certaines régions côtières où les animaux d'élevage étaient amenés à paître sur les grèves. Les microalgues sont aujourd'hui des ingrédients introduits dans l'alimentation animale pour plusieurs applications. On les retrouve dans la formulation des aliments sous forme de farines. Elles peuvent aussi intervenir comme compléments alimentaires en nutrition animale pour les poules pondeuses, les jeunes lapins, ou dans les pierres de sels minéraux (iode...) pour bovins, ovins, caprins [18].

I.4.4. Application dans l'agriculture

Les produits dérivés de microalgues ont des propriétés multifonctionnelles dans l'agriculture, ils facilitent l'absorption des nutriments, améliorent les cultures, améliorent l'état physiologique et la tolérance au stress abiotique. Malgré le fait que les microalgues produisent des composés actifs sur les plantes supérieures [39].

I.4.4.1. Utilisation comme engrais

La fertilisation est l'une des pratiques agricoles les plus courantes. À cet égard, les microalgues sont considérées comme un engrais organique, ayant le potentiel de prévenir les pertes de nutriments par une libération de N, P et K (azote, phosphore, potassium).

Les cyanobactéries (Les microalgues bleu-vert) ont une grande importance à la culture du riz peut être directement corrélée à sa capacité de fixation de l'azote atmosphérique [40]. Différents produits à base de microalgues MBS et MBF (Microalgues Biostimulants et Microalgues Biofertilisants) sont disponibles dans le commerce pour l'agriculture en tant que produits innovants et prometteurs pour améliorer les rendements des cultures [41].

I.4.6. Production d'énergie

L'énergie renouvelable est l'énergie qui provient de la source, qui est continuellement réapprovisionnée par la nature. Actuellement, les énergies renouvelables issues des microalgues contribuent bien à la production mondiale totale d'énergie [42].

I.4.6.1. Production de biodiesel

Les microalgues semblent être la seule source de biodiesel qui a un grand potentiel pour remplacer les diesels fossiles. La teneur en huile des microalgues peut aller du 16 à 68% de poids sec. Le rendement en huile des microalgues peut atteindre jusqu'à 136 900 L / ha par rapport à d'autres plantes qui varient du 172 à 5950 L / ha. *Chlorella* peut accumuler des lipides de stockage (triglycérides) jusqu'à 70% de poids sec sous forme d'azote [43].

I.4.6.2. Production de biocarburant

Les microalgues ont un grand potentiel en tant que sources de carburant renouvelables car elles possèdent un taux de croissance rapide et la capacité de stocker des lipides et des glucides de haute qualité à l'intérieur de leurs cellules pour la production de biocarburants [44]

Les biocarburants issus des microalgues appartiennent à la troisième génération et sont considérées comme une source d'énergie alternative pour les combustibles fossiles, sans les inconvénients associés. Plusieurs espèces de microalgues comme *Botryococcus braunii*, *Nannochloropsis sp*, *Dunaliella primolecta*, *Chlorella sp*, et *Cryptocodinium cohnii*, produisent de grandes quantités de hydrocarbures et lipides. *Botryococcus braunii* a la capacité de produire un grand nombre d'hydrocarbures par rapport à sa biomasse. La teneur en huile des espèces de microalgues atteint jusqu'à 80% et les niveaux de 20 à 50% sont assez courants. La microalgue *Chlorella sp* contient jusqu'à 50% de lipides et *B. braunii* produit la plus haute teneur en huile d'environ 80% [45].

II.1. Définition des métaux lourds

Les métaux lourds peuvent être définis comme un groupe de quarante éléments naturels qui ont un poids atomique élevé et une densité à au moins 5 fois supérieure à celle de l'eau. Ils sont dits dangereux en raison de leur toxicité même à faibles concentrations. Les contaminants de métaux lourds les plus courants sont le mercure (Hg), l'arsenic, le cadmium (Cd), le plomb (Pb), le chrome (Cr), le zinc (Zn) et le cuivre (Cu). En outre, ils sont non biodégradables donc, ils restent dans l'environnement et les systèmes biologiques [46].

Leurs multiples usages industriels, domestiques, agricoles, médicales et les applications technologiques ont conduit à leur large diffusion dans l'environnement [47]. Les métaux lourds dans les écosystèmes aquatiques sont capables de persister dans l'environnement, et d'être incorporés dans les chaînes alimentaires. Ils pénètrent dans ces systèmes aquatiques principalement par des intrants naturels tels que l'altération et l'érosion des roches et des sources anthropiques, y compris les activités urbaines, industrielles et agricoles, le ruissellement terrestre et l'élimination des eaux usées [48].

II.2. Les oligo-éléments

Ce sont des éléments existant dans des environnements naturels et perturbés en petites quantités, avec une biodisponibilité excessive ayant un effet toxique sur l'organisme vivant. Les oligo-éléments sont des micronutriments chimiques qui sont nécessaires plutôt en quantité infime, mais jouent un rôle vital dans le maintien de l'intégrité des divers processus physiologiques et métaboliques se produisant dans les tissus vivants, comme : Le chrome (Cr), cobalt (Co)... [49].

II.3. Classification des métaux lourds

II.3.1. Les métaux lourds essentiels

Ces métaux sont importants pour la vie des organismes vivants et peuvent être nécessaires dans le corps en concentrations assez faibles. Cependant, les métaux lourds essentiels peuvent être toxiques pour les êtres vivants lorsque la concentration dépasse la limite tolérable pour les organismes dont le Mn, Fe, Cu et Zn sont les plus utilisés [50].

II.3.2. Les métaux lourds non essentiels

Leurs rôles biologiques ne sont pas connus dans les organismes vivants. Ils sont très toxiques comme : Le Cd, le Pb et le Hg, tandis que le Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn et Mo sont des micronutriments ou oligo-éléments pour les plantes. Ils sont essentiels pour la croissance et la résistance au stress ainsi que pour la biosynthèse et les fonctions de différentes biomolécules comme les glucides, la chlorophylle, les acides nucléiques, les produits chimiques de croissance, et les métabolites secondaires [51].

II.4. Source des métaux lourds

II.4.1. Sources naturelles :

Les sources naturelles de métaux lourds comprennent principalement l'altération géologique, l'érosion des sols et les poussières en suspension dans l'air [52].

La contribution des volcans peut se présenter sous forme d'émissions volumineuses dues à une activité explosive, ou d'émissions continues de faible volume, résultant notamment de l'activité géothermique et du dégazage du magma [53].

II.4.2. Sources anthropiques :

Les métaux provenant d'apports anthropiques sont les métaux lourds comprenant les activités agricoles, telles que l'application de pesticides et d'herbicides, l'eau d'irrigation contaminée, les déchets municipaux utilisés pour la fertilisation, et même les engrais minéraux contenant des traces de métaux lourds. D'autres sources anthropiques de métaux lourds comprennent l'élimination directe des déchets sur les terres agricoles, les activités minières, l'utilisation du plomb comme anti-accroc dans l'essence, les émissions dues au trafic, le tabagisme, la métallurgie et la fonte, les bombes aérosols, les rejets d'eaux usées et les matériaux de construction, tels que les peintures [54].

II.5. La pollution du milieu aquatique par les métaux lourds

Les métaux présents dans l'eau peuvent exister sous forme complexes, particules ou en solutions. Les principaux processus qui gouvernent la distribution et la répartition des métaux lourds sont la dilution, la dispersion, la sédimentation et l'adsorption/désorption. Certains processus chimiques peuvent néanmoins intervenir également. C'est ainsi que la spéciation selon les diverses formes solubles est régie par les constantes d'instabilité des différents complexes, et par les propriétés physico-chimiques de l'eau (pH, ions dissous, et température) [55]. Les métaux lourds contaminent les eaux de surface et souterraines, entraînant une détérioration de la qualité de l'eau potable et de l'eau d'irrigation et peuvent pénétrer dans la chaîne alimentaire humaine, ce qui pose un risque pour la santé humaine. Certains métaux, dont le chrome, le plomb, le cadmium, l'arsenic et le mercure sont connus pour être très toxiques pour les humains et la vie aquatique, causant des problèmes hépatiques et rénaux en plus des cancérogènes génotoxiques. D'autres, comme le cuivre, le fer, le zinc, le manganèse et le cobalt, sont des éléments essentiels qui jouent un rôle important dans le métabolisme biologique à de très faibles concentrations [56]

II.6. Comment les métaux lourds entrent dans les écosystèmes aquatiques ?

Bien que les métaux lourds soient des éléments naturels que l'on retrouve dans la croûte terrestre, la contamination de l'environnement peut également se produire par la corrosion des métaux, les dépôts atmosphériques, l'érosion du sol des ions métalliques et la lixiviation des métaux lourds, la remise en suspension des sédiments et l'évaporation des métaux des ressources en eau vers le sol et les eaux souterraines. Des phénomènes naturels tels que l'altération et les éruptions volcaniques auraient également contribué de manière significative à la pollution par les métaux lourds. Les sources industrielles comprennent le traitement des métaux dans les raffineries, la combustion du charbon dans les centrales électriques, la combustion du pétrole, les centrales nucléaires et les lignes à haute tension, les plastiques, les textiles, la microélectronique, la préservation du bois et les usines de transformation du papier [57].

II.7. Effet des métaux lourds sur les différents organismes

Des concentrations élevées des métaux essentiels et non essentiels (Hg, As, Cd, Pb, Cr) provoquent des effets néfastes (altération du mécanisme photosynthétique, blocage de la division cellulaire, inhibition d'activité enzymatique) dans les cellules de microalgues [58]. Dans les systèmes biologiques, il a été rapporté que les métaux lourds affectent les organites cellulaires et les composants tels que la membrane cellulaire, les mitochondries, le lysosome, le réticulum endoplasmique, les noyaux et certaines enzymes impliquées dans le métabolisme, la détoxification et la réparation des dommages. Il a été constaté que les ions métalliques interagissent avec des composants cellulaires tels que l'ADN et les protéines nucléaires, provoquant des dommages à l'ADN et des changements de conformation qui peuvent conduire à une modulation du cycle cellulaire, à la cancérogenèse ou à l'apoptose [57].

II.8. Mécanisme de toxicité des métaux lourds

II.8.1. Interaction avec l'ADN

Les ions métalliques peuvent également interagir avec l'ADN, c'est notamment le cas du nickel, du chrome et du platine. Le nickel peut par exemple, par compétition avec le magnésium, modifier la condensation de la chromatine et réprimer ainsi l'expression de gènes.

II.8.2. Accumulation de dérivés réactifs de l'oxygène et stress oxydant

Les métaux peuvent engendrer l'accumulation de dérivés réactifs de l'oxygène (ROS, Pour *reactive oxygen species*), provoquant un état de stress oxydant qui semble être l'une des principales causes de la toxicité des métaux [59].

Exemple de métaux lourds : Le mercure

Le mercure est un métal ubiquitaire présent sous forme liquide à température ambiante. Il se combine facilement avec d'autres molécules telles que les métaux, les molécules inorganiques ou organiques [60]. Le mercure, l'un des métaux lourds les plus toxiques, est une substance chimique préoccupante à échelle mondiale du fait de sa propagation atmosphérique, et de sa persistance et de l'environnement. Aujourd'hui, la toxicité du mercure demeure une préoccupation importante dans nombreux pays. Par exemple au Japon la consommation de certaines populations de mammifères marins est interdite parce que leurs teneurs en méthyle mercure sont trop élevées [61]. Le mercure existe dans la nature principalement sous forme de mercure élémentaire ou de sulfure et se trouve dans la croûte terrestre. Les expositions atmosphériques proviennent du dégazage des roches ou de l'activité volcanique. Le mercure élémentaire atmosphérique se dépose dans l'eau, où il est converti par des micro-organismes en mercure organique (méthyle ou éthyle), qui est ingéré par des créatures plus petites qui sont finalement consommées par de plus gros poissons [62].

Les composés du mercure exercent des effets toxiques sur la santé par différents mécanismes tels que; interruption de la formation des microtubules, modification de l'équilibre calcique intracellulaire et du potentiel membranaire, altération de l'intégrité de la membrane cellulaire, perturbation ou inhibition des enzymes, induisant un stress oxydatif, inhibition de la synthèse des protéines et de l'ADN et perturbation des fonctions immunitaires.

Le mercure se lie aux groupes phosphoryle, carboxyle et amide dans les molécules biologiques. Le méthylmercure induit un stress oxydatif et les radicaux libres peuvent provoquer une neurotoxicité. D'autre part, il a été rapporté que l'accumulation de sérotonine, d'aspartate et de glutamate joue un rôle dans le mécanisme de neurotoxicité induite par le méthyl mercure.

Le méthylmercure est converti en forme inorganique et se lie aux molécules contenant du sulfhydryle. Le mercure inorganique et le méthylmercure se lient aux protéines contenant du thiol, par exemple la glutamine, la cystéine, l'albumine, etc. Ces complexes affectent la distribution du mercure dans le corps [63].

III.1. But de la culture des microalgues

De nombreuses études ont montré que la culture des microalgues est au centre de la résolution de nombreux problèmes environnementaux: la production de biocarburants renouvelables, la production de biomasse pour l'alimentation animale ou les piscicultures, l'assimilation des gaz à effet de serre et le traitement des eaux usées [64].

La production commerciale de microalgues est d'environ 5 000 tonnes / an de matière sèche. Il y a environ 110 producteurs commerciaux de microalgues présents dans la région Asie-Pacifique, avec des capacités allant de 3 à 500 tonnes / an. Environ les neuf dixièmes de la culture d'algues se trouvent en Asie. Parmi ceux-ci, un grand nombre de producteurs commerciaux de microalgues se trouvent en Chine, à Taiwan et en Inde. Très peu d'espèces de microalgues ont une importance commerciale, comme celles qui incluent la Spiruline, la Chlorelle, *Haematococcus*, *Dunaliella*, *Botryococcus*, *Phaeodactylum*, *Porphyridium*, *Chaetoceros*, *Cryptocodinium*, *Isochrysis*, *Nannochloris*, *Nitzschia*, *Schizochytrium*, *Tetraselmis* et *Skeletonema* [11].

Les espèces de microalgues les plus cultivées sont par ordre décroissant : la cyanobactérie *Arthrospira* (la spiruline, qui représenterait 50% de la production mondiale), suivie par les microalgues vertes *Chlorella*, *Dunaliella*, *Haematococcus*, *Nannochloropsis* et la diatomée *Odontella* [14]. Ce sont les principaux microalgues cultivées en raison de leurs capacités à utiliser l'azote inorganique et du phosphore pour leur croissance et leur capacité à éliminer les métaux lourds d'une part. Par exemple : La capacité de *Chlorella vulgaris* à éliminer les nutriments et rapporté une efficacité d'élimination des nutriments de 86% pour le N inorganique et de 78% pour le P. inorganique. D'autre part, les algues ont pour avantages de pouvoir être cultivées dans des étangs avec peu d'apport nutritionnel ou d'entretien. Les expériences sur le terrain ont indiqué que les microalgues ont un rôle efficace dans la détoxification des métaux des eaux usées des mines. En utilisant des cyanobactéries dans un système de piscines et de méandres artificiels, 99% des métaux dissous et particuliers pourraient être éliminés. *Coelastrum proboscideum* absorbe 100% du plomb d'une solution à 1,0 ppm après 20 h à 23 ° C et environ 90% après seulement 1,5 h à 30 ° C. Le cadmium a été absorbé un peu moins efficacement, environ 60% du cadmium étant absorbé par une solution à 40 ppb après 24 h. Vymazal (1984), ont étudié *Cladophora glomerata* dans des canaux artificiels d'eau douce et ont découvert que les algues étaient d'excellents accumulateurs de zinc. Des cas d'accumulation de Cu^{2+} , Pb^{2+} et Cr^{3+} ainsi que de Ni^{2+} , Cd^{2+} , Co^{2+} , Fe^{2+} et Mn^{2+} ont également été montré par des algues [65].

III.1. Différents systèmes de culture des microalgues

Un large éventail de techniques de culture de microalgues a été rapporté dans la littérature. Il existe de nombreux types de techniques pour la culture de microalgues en fonction du coût d'investissement, du produit souhaité, la source de nutriments et le CO₂ capturé [43]. Les microalgues peuvent être cultivées dans des systèmes de culture ouverts tels que les étangs et également en culture fermée hautement contrôlée.

III.1.1. Système ouvert

Les systèmes de culture ouverts sont les principaux systèmes utilisés pour produire les microalgues commercialisés. Les étangs ouverts ont l'application la plus large car leur construction est relativement simple, avec un fonctionnement et une maintenance à faible coût [66].

Il existe principalement trois types de systèmes ouverts : système ouvert non remué, étang circulaire et étang du chemin de roulement.

III.1.1.1 Système ouvert sans agitation (non remué)

Appelé aussi système non remué (Figure 02) la plupart des systèmes d'eau naturels sont sans unité d'agitation. Cela conduit à un mauvais mélange, mais à un coût inférieur pour la culture à l'échelle commerciale comme les lacs, les lagunes [67].

Ils sont largement utilisés pour certaines espèces de microalgues (*Dunaliella salina*). Cependant, ce type d'étang est très limité dans ses applications, étant donné que les microalgues ne peuvent pas se développer dans des conditions de croissance souvent médiocres et en compétition avec des protozoaires, des bactéries et des virus contaminants [43].



Figure 02: Photo d'un étang non-remués [68].

III.1.1.2. Étangs de raceway

Un étang de raceway (Figure 03) est constitué d'une boucle fermée et d'un canal de recirculation de la suspension microalgales qui est généralement d'environ 0,3 m de profondeur. Leur principe est de faire circuler les algues sur une faible largeur et profondeur (entre 15 et 50 cm) mais sur une grande distance. Le mélange et la circulation de la culture sont produits par une roue à aubes. *Chlorella*,

Spirulina, *Dunaliella* et *Haematococcus* sont les espèces d'algues les plus communes qui peut être cultivée dans un étang de raceway, et la culture peut être soit une culture pure.



Figure 03: Photo d'un étang de raceway [69].

III.1.1.3. Etangs circulaires

Les étangs circulaires (Figure 04) sont principalement utilisés pour la culture de *Chlorella sp.*, en Asie. Ce type d'étang est toujours de 20 à 30 cm de profondeur et de 40 à 50 m diamètre. L'agitation de la culture est effectuée par un long bras rotatif placé au centre de l'étang qui agit comme un cadran d'horloge et effectue une fonction de roue à aubes. Ils nécessitent un fort investissement en matériel

[67].



Figure 04 : photo d'un étang circulaire [69].

III.1.2. Système fermé

Les microalgues peuvent être cultivées en système fermé sous conditions contrôlées, telles que l'utilisation de la lumière, la surface requise et le pourcentage de dioxyde de carbone. Ils comportent :

III.1.2.1. Photobioréacteurs

Contrairement aux systèmes ouverts, les photobioréacteurs fermés visent la culture axénique monospécifique de microalgues. Les photobioréacteurs ont été utilisés avec succès pour la production de grandes quantités de biomasse de microalgues [70]. Un photobioréacteur est principalement un bioréacteur dans lequel une source lumineuse est incorporée pour que les organismes puissent se croître en utilisant l'énergie lumineuse [66].

a. Photobioréacteurs plans

Ce type de photobioréacteurs (Figure 05) permet d'offrir une large surface éclairée, avec des épaisseurs de culture très faibles, de quelques centimètres, voire inférieures au centimètre. L'agitation s'effectue par l'injection de l'air ou par une pompe. Ils peuvent être installés à l'extérieur. L'accumulation de dioxygène dissous est relativement faible dans les photobioréacteurs plats par rapport aux photobioréacteurs tubulaires horizontaux [18].



Figure 05: Photo d'un photobioréacteur plan [71].

b. Photobioréacteurs tubulaires

Les photobioréacteurs tubulaires (Figure 06) consistent à un réseau de tubes droits, enroulés ou tubes transparents en boucle qui sont généralement faits de plastique transparent ou de verre. Les algues circulent dans les tubes par une pompe ou une technologie de transport aérien. Ils peuvent être éclairés par des tubes fluorescents ou simplement exposés à la lumière du soleil. L'apport en nutriment, en CO₂ et en milieu est généralement effectué par une cuve annexe aux tubes. Il existe plusieurs types de photobioréacteurs tubulaires soit horizontaux droit ou enroulés [70].



Figure 06: Photo de photobioréacteurs tubulaires a) [72] horizontaux; b) enroulés [73].

c. Photobioréacteurs à colonne verticale

Les bioréacteurs à air et de type colonne à bulles sont des dispositifs simples qui ont été utilisés dans le biotraitement, le traitement des eaux usées et l'industrie des procédés chimiques. Ces photobioréacteurs à colonne verticale (Figure 07) sont composés de tubes en verre ou en acrylique qui permettent la pénétration de la lumière pour la culture d'algues. Un système de pulvérisation de gaz est placé au fond du réacteur convertit le gaz d'entrée en minuscules bulles, qui permet le mélange de la suspension, le transfert de la masse de CO_2 et l'élimination de l' O_2 produit pendant la photosynthèse. Normalement, aucun système d'agitation physique n'est mis en œuvre dans la conception d'un photobioréacteur à colonne verticale. Il existe : Réacteurs de colonnes à bulles, réacteurs de transport aérien (air lift) [74].

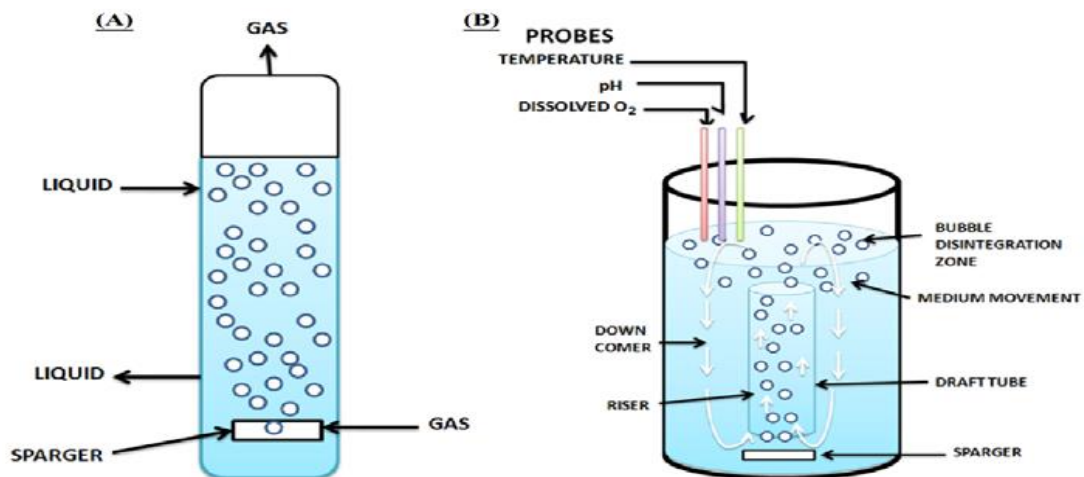


Figure 07: Diagramme schématique du bioréacteur vertical: A) Réacteur à colonne à bulles B) Réacteur de transport aérien (air-lift) [74].

III.3. Paramètres influençant la culture des microalgues

III.3.1. Lumière

La lumière est sans doute l'un des facteurs les plus importants pour la croissance des microalgues. En tant que réaction endothermique, la fixation du carbone nécessite de l'énergie et celle-ci est principalement fournie par la lumière. Cette énergie permet aux cellules de microalgues de subir le processus de photosynthèse qui convertit le dioxyde de carbone (CO₂) en composés organiques tels que les glucides et les protéines tout en libérant de l'oxygène comme déchet [75].

Des intensités lumineuses plus élevées augmenteront le taux de photosynthèse à un certain point maximum, après quoi il se stabilise jusqu'à ce que le taux de photosynthèse soit équilibré par photorespiration et photoinhibition. Ainsi, une intensité lumineuse optimale doit être déterminée expérimentalement dans chaque cas maximisé le CO₂ assimilé avec un taux minimum de photorespiration et aussi peu de photoinhibition que possible [76].

III.3.2. Dioxyde de carbone (CO₂)

Les microalgues peuvent se développer dans des systèmes autotrophes, utilisant la lumière et le dioxyde de carbone, ou dans des systèmes hétérotrophes, où les composés organiques sont utilisés comme source d'énergie et de carbone, ou également dans des systèmes mixotrophes, où la source lumineuse et le substrat organique sont simultanément une source d'énergie, en plus du CO₂ et le substrat organique comme source de carbone. Les microalgues ont montré une croissance optimale avec 20% de CO₂ présent dans l'air injecté. L'apport de CO₂ aux cultures de microalgues permet d'augmenter la productivité de la biomasse, mais la réduction du pH, résultant de l'augmentation de la disponibilité du CO₂ dans la phase aqueuse, peut inhiber la croissance de certaines espèces de ces microorganismes [77].

III.3.3. Température

La température est un facteur important dans la croissance des microalgues et influence directement les processus biochimiques, y compris la photosynthèse, dans l'usine de cellules d'algues. Chaque espèce a sa propre température de croissance optimale. L'augmentation de la température jusqu'à la plage optimale augmente de façon exponentielle la croissance des algues, mais une augmentation ou une diminution de la température au-delà du point optimal retarde ou même arrête la croissance et l'activité des algues. La plage de température optimale pour la plupart des espèces d'algues est de 20 à 30 [12]. Mais peut augmenter jusqu'à 40 °C pour les souches thermophiles (*Chaetoceros*, *Anacystisnidulans*) ou diminuer jusqu'à 17°C pour les souches psychrophiles (*Asterionella formosa*) [78].

II.3.4. pH

Le potentiel hydrogène (pH) a une grande importance dans les cultures de microalgues, car il détermine la solubilité des minéraux et du dioxyde de carbone dans le milieu, en plus d'affecter les microalgues elles-mêmes. Plusieurs facteurs peuvent influencer le pH du milieu de culture, tels que la composition et la capacité tampon, la quantité de dioxyde de carbone dissous, la température et l'activité métabolique des cellules. La plupart des espèces de microalgues préfèrent un pH neutre, sauf les espèces marines, qui préfèrent des valeurs de pH de 8, 0 à 8, 4. Certaines espèces comme *Spirulina platensis* peuvent même tolérer le pH 9.

II.3.5. Nutriments

Le milieu de culture idéal pour les microalgues doit contenir dans sa composition des éléments inorganiques tels que l'azote (N), le phosphore (P), le fer (Fe), entre autres, qui peuvent varier selon les espèces cultivées. Les exigences nutritionnelles minimales nécessaires à leur croissance peuvent être déterminées à l'aide de la formule moléculaire approximative. Le carbone représente environ 40 à 50% du contenu cellulaire total et il constitue la base du métabolisme central dans les cellules. À côté du carbone, l'azote est le deuxième nutriment majeur, il représente environ 1 à 10% de la teneur totale en cellules. C'est généralement fourni sous forme de nitrate, bien que d'autres formes d'azote, comme l'ammonium et l'urée, puissent être utilisées [79].

III.4. Effets toxiques des métaux lourds sur les microalgues

Les métaux à petites concentrations sont indispensables pour que les cellules de microalgues remplissent des fonctions cellulaires. Ils agissent en tant que composants des protéines photosynthétiques de transport d'électrons (Cu, Fe) et des centres d'oxydation de l'eau photosynthétique (Mn) ou sont des constituants de vitamines (Co). Ils servent également de cofacteurs aux enzymes participant à la fixation du CO₂ (Zn dans l'anhydrase carbonique), à la transcription de l'ADN (Zn dans l'ARN polymérase) et à l'acquisition du phosphore (Zn dans la phosphatase alcaline) ou à l'assimilation du N₂ (Mo, Fe, V dans la nitrogénase) et la réduction des nitrates (Mo dans le nitrate et Fe dans la nitrite réductase). Cependant, des concentrations élevées de ces métaux et d'autres métaux lourds non essentiels (Hg, As, Cd, Pb, Cr) provoquent des effets négatifs (altération du mécanisme photosynthétique, blocage de la division cellulaire, inhibition de l'activité enzymatique) dans les cellules de microalgues. Les métaux influencent également la morphologie des cellules microalgales [80].

III.4.1. Effets toxiques sur la croissance des microalgues

De nombreux ions de métaux lourds ont un effet direct sur divers processus physiologiques et biochimiques des microalgues. La croissance reflétant le métabolisme de la cellule, il a été utilisé comme un indicateur clé de la toxicité des ions métalliques dans les microorganismes [80]. Ces métaux sont fréquemment trouvés comme polluants de l'eau douce tels que le Cu, le Pb et le Co qui sont fortement phototoxiques, provoquant une inhibition de la croissance et même la mort des microalgues. En général, les effets toxiques des polluants métalliques dans les cellules végétales sont liés à leur forte réactivité, entraînant une inhibition de l'activité métabolique [81]. Les métaux influencent également la morphologie des cellules microalgales. L'accumulation de cadmium (Cd) dans les cellules de *Chlamydomonas acidophila* a entraîné une augmentation de la taille des cellules et une décomposition des corps polyphosphatés [79].

L'inhibition de la croissance dans les microalgues est liée à la quantité d'ions de métaux lourds liés à la surface des cellules algales, dans certains cas, à la quantité d'ions de métaux lourds intracellulaires et à la nature chimique des ions de métaux lourds. Cependant, pour le zinc, l'inhibition de la croissance ne peut pas être liée à la concentration intracellulaire en métal, mais au zinc. En fait, le mode possible d'action toxique du zinc est lié à la membrane cellulaire, où il peut perturber l'absorption du calcium qui est nécessaire pour l'activité de l'ATPase dans la division cellulaire [82].

III.4.2. Effets sur la photosynthèse

Chez les microalgues, les métaux lourds ont un effet beaucoup plus élevé sur les fonctions physiologiques telles que la photosynthèse et la respiration. En particulier, l'activité photosynthétique a été fortement compromise par le traitement au métal. Les métaux lourds peuvent inhiber le système photosynthétique (IIPS II) à la suite de dommages aux membranes thylakoïdes et aux centres de réaction. En fait, les cellules des microalgues (*Chlorella*) ont montré une altération ultrastructurale dans la forme et l'organisation des thylakoïdes qui confirment un endommagement de l'appareil photosynthétique. Grace aux perturbations de l'échange de cations induite par le métal- La forme des chloroplastes est modifiée [83]. L'exposition des microalgues à des concentrations élevées des métaux lourds ont montré une diminution dans la teneur des pigments et cette réduction a été associée avec une augmentation de la concentration de métal dans le milieu de culture et le temps d'incubation [84].

III.5. Elimination des métaux lourds par les microalgues

Les métaux lourds pénètrent dans les cellules des microalgues par les transporteurs micronutriments. Lorsque les métaux entrent dans la cellule, ils se lient à des composés intracellulaires et ils sont transportés vers des compartiments cellulaires spécifiques à lieu, ce qui aide à désintoxication des métaux lourds [85].

L'élimination des métaux par différents organismes : les algues, les bactéries, les champignons et les levures a été largement étudiée au cours des deux dernières décennies. Parmi les micro-organismes étudiés, les microalgues retiennent de plus en plus l'attention, car les algues, en particulier les algues marines, sont une source riche dans l'environnement océanique, relativement informel à traiter et capable d'accumuler une forte teneur en métaux [86].

III.5.1. Adsorption

L'adsorption peut se réaliser directement sur la paroi des cellules et/ou indirectement dans un mucus exo-polysaccharidique. Elle est rapide et réversible, mobilise les charges portées par les groupes fonctionnels chargés négativement portés par la paroi [87]. L'adsorption de métal par les microalgues se fait, soit activement (bioaccumulation) et / ou passivement (biosorption). Cela est dû à l'affinité des surfaces d'algues pour les métaux lourds conduisant à leur adsorption et précipitation [88].

III.5.1.1. Bioaccumulation

a. Définition de bioaccumulation

La bioaccumulation définie par liaison intracellulaire a un organisme vivant [89]. La bioaccumulation décrit un processus actif par lequel l'élimination des métaux nécessite l'activité métabolique d'un organisme vivant [90]. La bioaccumulation de métaux par les algues peut créer une méthode réalisable pour assainir l'eau contaminée avec des métaux. Il est bien établi que plusieurs espèces marines et les algues d'eau peuvent absorber divers métaux lourds de manière sélective des milieux aqueux et d'accumuler ces métaux dans leurs cellules. Il a été démontré que les microalgues accumulent par exemple l'arsenic et pourraient potentiellement assainir par adsorption et biotransformation de l'arsenic inorganique [91].

b. Mécanisme de la bioaccumulation

La bioaccumulation est un processus métaboliquement actif où les micro-organismes absorbent les métaux lourds dans leur espace intracellulaire en utilisant des complexes d'importateurs qui créent une voie de translocation à travers la bicouche lipidique (c'est-à-dire le système d'importation). Une

fois à l'intérieur de l'espace intracellulaire, les métaux lourds peuvent être séquestrés par des protéines et ligands peptidiques c.-à-d. système de stockage, (Figure 08) [92].

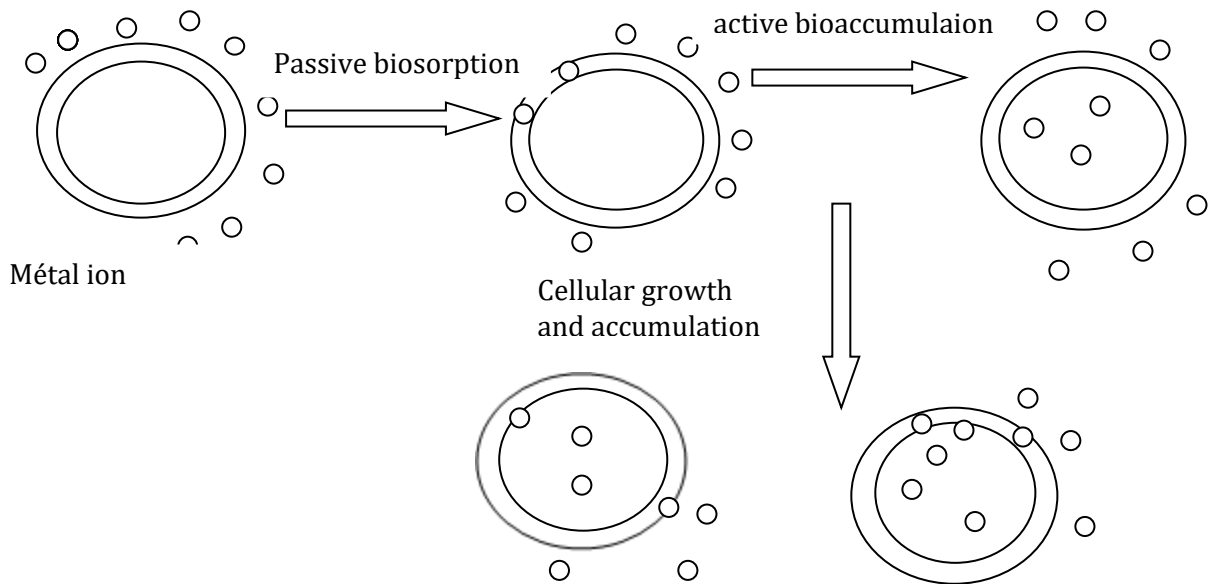


Figure 08: Présentation schématique des étapes de la bioaccumulation des ions métalliques [92].

III.5.1.2. Biosorption

a. Définition de la biosorption

La biosorption (Figure 09) signifie la capacité des matériaux biologiques à s'accumuler des ions, atomes ou molécules provenant des eaux usées ou de solutions aqueuses par des voies physico-chimiques d'adsorption [93]. Elle se produit par l'interaction d'ions métalliques dans une solution avec des groupes fonctionnels sur la paroi cellulaire de la biomasse. La biosorption passive se produit rapidement dans les 5 à 10 minutes suivant le contact initial avec les cellules. De plus, il est indépendant du métabolisme [94].

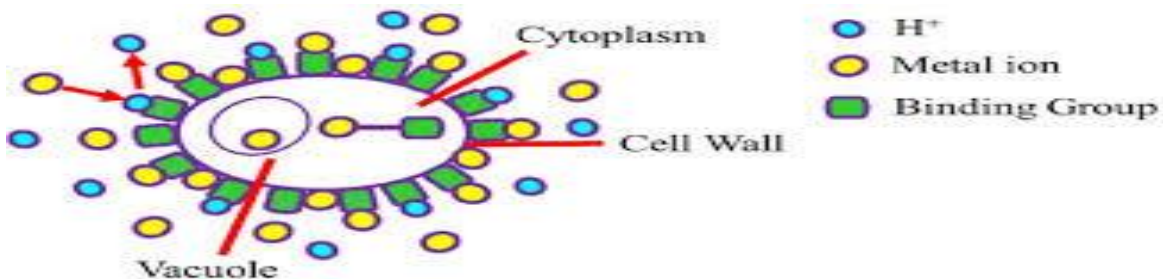


Figure 09: Une représentation schématique de la biosorption des ions métalliques toxiques par une cellule d'algue [94].

La biosorption par les algues et les microalgues marine offrent plusieurs avantages tels que: (1) divers groupes multifonctionnels à leur surface, (2) répartition relativement petite et uniforme des sites de liaison à la surface, (3) nécessite des étapes préparatoires minimales, (4) pas ou moins de consommation de produits chimiques agressifs, (5) Naturellement renouvelable, recyclable et facilement disponible toute l'année, (6) excellente capacité de rétention, etc [5].

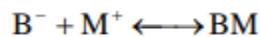
b. Mécanisme de biosorption

Le mécanisme de biosorption (Figure 10) est complexe et implique une combinaison de plusieurs mécanismes indépendants conduisant à l'adsorption de métaux. La compréhension du mécanisme sous-jacent pourrait aider à développer un processus de biosorption [84]. La biosorption implique de nombreux mécanismes tels que l'échange d'ions, la chélation, la complexation et la précipitation de surface :

b1. Transport à travers la membrane cellulaire : Les métaux lourds sont transportés aux cellules d'une manière similaire au transport de métaux essentiels comme le magnésium, le calcium et le potassium. La biosorption est réalisée en 2 étapes: premièrement, les métaux sont liés à la paroi cellulaire, deuxièmement, les ions métalliques sont transportés à l'intérieur de la membrane cellulaire par absorption intracellulaire.

b2. Adsorption physique : elle se produit grâce à des forces de Vander Waals. Les ions de métaux tels que le cadmium, le cuivre, le cobalt, le zinc et l'uranium, s'adsorbent à la surface de diverses algues mortes, en raison de la force électrostatique. Cette force se produit entre les ions métalliques et les parois des cellules.

b3. Échange d'ions: de nombreux microorganismes ont leurs parois cellulaires composées de divers polysaccharides. Les ions des polysaccharides sont échangés par les ions de métaux lourds. Cet échange ne peut avoir lieu qu'en cas d'ions bivalents.



Où B = site de liaison libre, M = adsorbat métallique, BM = métal adsorbé sur la surface microbienne.

b4. Complexation: Les métaux lourds peuvent également être éliminés par la formation d'un complexe qui résulte à partir d'interaction entre les métaux et les groupes actifs présents à la surface des cellules. Ce mécanisme se produit uniquement à la surface des cellules. C'est le seul mécanisme au moyen duquel divers ions métalliques comme le calcium, le magnésium, le cadmium, le zinc, le mercure et le cuivre sont adsorbés à la surface des microorganismes.

b5. Précipitations: Ce mécanisme peut être mis en œuvre de 2 manières:

- Précipitations en fonction de l'activité métabolique de la paroi cellulaire microbienne: Dans ce cas, le système d'autodéfense actif de la cellule réagit en présence de métaux lourds conduisant à la formation de divers composés favorisant la précipitation.
- Précipitations indépendantes de l'activité métabolique de la paroi cellulaire microbienne: dans ce cas, la précipitation se produit à la suite d'une réaction entre le métal et la surface de la paroi cellulaire [95].

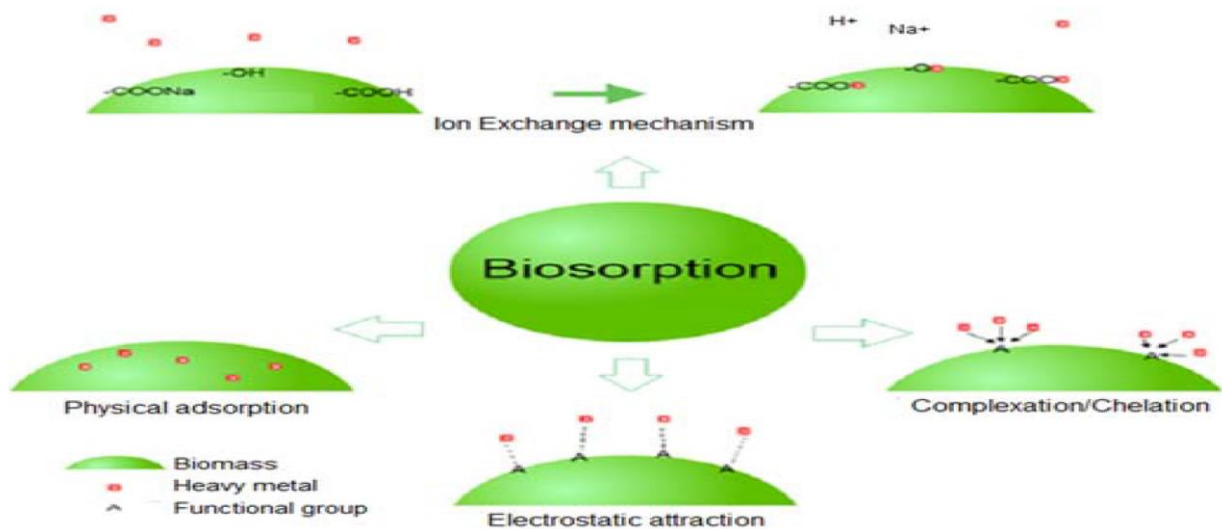


Figure 10: Une représentation schématique des mécanismes impliqués dans la bio sorption des ions métalliques potentiellement toxiques [94].

III.6. Facteurs influençant l'élimination des métaux lourds par les microalgues

III.6.1. pH

Le pH a un effet direct sur la teneur en ions métalliques dans la biomasse algale, à savoir la capacité nette de sorption de la biomasse algale (L'affinité des ions métalliques avec les algues) et la solubilité des ions métalliques [96]. Des études sur les charges de surface ont montré que la disponibilité des sites libres dépendait du pH. Avec l'augmentation du pH, les sites chargés en surface d'alginate de calcium sont devenus plus négatifs, donc l'absorption des ions métalliques a augmenté avec augmentation du pH. Avec la diminution du pH, le nombre de sites de liaison est réduit et ce pH a augmenté pendant l'absorption des ions métalliques [97].

III.6.2. Concentration de la biomasse

L'augmentation de la concentration de biomasse a amélioré l'absorption des métaux en raison du nombre plus élevé de sites de liaison aux métaux disponibles. À la fois, une diminution de

L'élimination des métaux est souvent signalée à des niveaux de biomasse très élevés en raison de l'agrégation partielle de la biomasse, ainsi que d'une diminution dans la distance moyenne entre les sites d'adsorption disponibles. Exemple la biosorption de cuivre par *Chlorella vulgaris* diminue lorsque la concentration de biosorbant augmente (40, 5 g). De même, une réduction marquée de l'adsorption de plomb par *Spirulina maxima* a été signalée lorsque la concentration de la biomasse est passée de (0, 1 à 20g) [98]. Donc la concentration en métaux lourds ainsi que la concentration en sorbant influençant l'efficacité de la l'adsorption. Cela est dû à la disponibilité des sites de liaison responsables pour l'élimination des ions métalliques [99].

III.6.3. Température

L'effet de la température sur la bioaccumulation des métaux chez les microalgues diffère selon le type de métal et de la microalgue. Si la température augmente, elle améliore généralement l'élimination biosorptive du polluant absorbé, en augmentant la surface l'activité et l'énergie cinétique de l'adsorbat, mais peuvent endommager la structure physique du biosorbant (microalgues) [90]. Dans certains cas, la bioaccumulation augmente avec la température : la teneur en Ni²⁺ adsorbée par *C. vulgaris* est plus importante à température élevée. Par contre la sorption de Ni²⁺ par *Oedogonium hatei* révèle un caractère exothermique. L'augmentation de la température conduit à une diminution de la concentration en ions métalliques absorbés : à 298°K on trouve 42 mg Ni/g de biomasse, contre 37,3 mg Ni/g de biomasse à 318°K [92].

III.6.4. Temps de contact

L'efficacité ou la capacité de biosorption des métaux a été augmenté avec le temps de contact jusqu'à ce que l'équilibre soit atteint. La sorption rapide est plus souhaitable en pratique car elle réduit la taille de la colonne de biosorption et rend le processus plus rentable. Il y a une grande variation dans le temps requis pour atteindre l'équilibre [100].

III.6.5. Concentration de métal

La biosorption des ions métalliques à la surface de la cellule augmente progressivement jusqu'à atteindre une concentration optimale, plus tard, elle diminue progressivement. La tendance des métaux est expliquée par la capacité des sites actifs à absorber complètement les ions métalliques à des concentrations plus faibles, tandis que des concentrations plus élevées causé la saturation des sites d'adsorption [101].

Conclusion

La pollution des milieux aquatiques par les métaux lourds est un sérieux problème en raison du risque de toxicité des métaux. Les algues, qui présentent des capacités d'accumulation, d'adsorption et de récupération de métaux lourds, sont bien étudiées pour leur potentialité, leur mécanisme d'accumulation et la modélisation de l'adsorption des métaux. Les microalgues, en particulier, possèdent plusieurs mécanismes appréciables pour séquestrer les ions des métaux lourds, et sont donc plus utilisées comme des biosorbants prometteurs. De nombreux rapports suggèrent leur supériorité sur diverses méthodes physicochimiques commerciales et traditionnelles, et leur utilité dans les technologies d'assainissement à grande échelle ainsi que dans l'élimination des métaux des effluents.

Les capacités de bio-élimination des microalgues ont été largement étudiées dans le monde et leurs avantages ont été véritablement projetés; cela s'est traduit par leur utilité dans diverses applications commerciales, environnementales et technologiques. Cependant, il est essentiel de baser sur les différentes avenues des technologies de remédiation des microalgues comme alternatives respectueuses de l'environnement pour un meilleur environnement.

Les microalgues peuvent être cultivées dans des systèmes de culture ouverts : système ouvert non remué, étang circulaire et étang de racey et également en culture fermée dans des conditions hautement contrôlées telles que : l'utilisation de la lumière, la surface requise et le pourcentage de dioxyde de carbone.

Les microalgues éliminent les métaux lourds par plusieurs mécanismes dont le plus important est celui de l'adsorption. L'adsorption de métal par les microalgues se fait, soit activement (bioaccumulation) soit passivement (biosorption).

Le développement de technologies permet la détection et l'élimination simultanées de métaux toxiques à l'aide de microalgues contribuera à la biorestauration de métaux toxiques provenant de sites contaminés et d'effluents industriels. La compréhension des mécanismes d'élimination des métaux par les microalgues permettra ainsi l'utilisation de moyens verts, non toxiques et efficaces pour la biorestauration des métaux lourds.

Aujourd'hui, des avancées technologiques importantes semblent proposer l'amélioration du confinement de la biomasse par des techniques d'immobilisation, ainsi que l'introduction de microalgues génétiquement modifiées pour augmenter l'efficacité énergétique avec l'utilisation de nutriments limités et éviter la contamination sur le terrain par des gènes résistants pourrait être une option.

Ce travail indique clairement que les microalgues ont le potentiel de devenir un biosorbant efficace et économique pour la biorestauration des métaux lourds.

*Références
bibliographiques*

- [1] - Navarro-Ortega A., Acuña V., Bellin A., Burek P., Cassiani G., Choukr-Allah R., Dolédec S., Elozegi A., Ferrari F., Ginebreda A., Grathwohl P., Jones C., Rault PK., Kok K., Koundouri P., Ludwig R.P., Merz R., Milacic R., Muñoz I., Nikulin G., Paniconi C., Paunović M., Petrovic M., Sabater L., Sabaterb S., Skoulikidis N T., Slob A., Teutsch G., Voulvoulis N., Barceló D., (2015) Managing the effects of multiple stressors on aquatic ecosystems under water scarcity: The globaqua project, *The Science of the total environment*, 2015, 503, (504), 3-9. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2014.06.081.
- [2] - Cameron H., Mata MT., Riquelme C., (2018), The effect of heavy metals on the viability of *tetraselmis marina* AC16-MESO and an evaluation of the potential use of this microalga in bioremediation, *Peer chemistry journals*, 6, 5295-5308. Doi: 10.7717 / peerj.5295.
- [3] - Rai PK., (2008), Heavy metal pollution in aquatic ecosystems and its phytoremediation using wetland plants: an ecosustainable approach, *International Journal Phytoremediation*, 10, (2), 133 -160. Doi: 10.1080/15226510801913918.
- [4] - Dagang S., Pan K., Tariq A., Azizullah A., Sun F., Li Z., (2016), Adsorptive removal of toxic chromium from waste-water using wheat straw and eupatorium adenophorum, *PLoS ONE*, 11,12-27. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0167037>.
- [5] -Bilal M., Rasheed T., Sosa-Hernández J E., Raza A., Nabeel F., Iqbal H M N., (2018), Biosorption: An interplay between marine algae and potentially toxic elements, *Marine Drugs*, 16 ,2 (18), 65-81. Doi: 10.3390 / md16020065.
- [6] -Arumugam N., Chelliapan S., Kamyab H., Thirugnana S., Othman N., Nasri N S., (2018), wastewater treatment with algae a review, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15 ,2851-2068 Doi: 10.3390 / ijerph15122851.
- [7] - Zarate, A., Florez, J., Angulo, E., Varela-Prieto, L., Infante, C., Barrios, F., ... & Valdes, J. Zarate, A. M., Florez, J. Z., Angulo, E., Varela-Prieto, L., Infante, F., Barrios, C., Barraza, B., Gallardo, D.I. and Valdes, J. (2017), Burkholderia tropica as a potential microalgal growth-promoting bacterium in the biosorption of mercury from aqueous solutions, *Journal of Microbiology Biotechnology*, 27, 1138-1149. Doi:10.4014/jmb.1611.11059.
- [8]- Diep P., Radhakrishnan M., Alexander F., (2018), Heavy metal removal by bioaccumulation using genetically engineered microorganisms, *Front Bioengineering and Biotechnology*, 6, 157-177. Doi: 10.3389/fbioe.2018.00157
- [9]- Kumar S K., Dahms H U., Won E J., Lee J S., Shin KH., (2015), Microalgae - a promising tool for heavy metal remediation, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 113,329-352. Doi:10.1016/j.ecoenv.2014.12.019.

- [10]- **Kröger M., Langer F M.**, (2012), Review on possible algal-biofuel production processes, *Biofuels*, 3, 3, 333-349, <https://doi.org/10.4155/bfs.12.14>.
- [11]- **Sathasivam R., Radhakrishnan R., Hashem A., Abd Allah E F.**, (2019), Microalgues metabolites Arich source for food and médecine, *Saudi Journal Biologie Science*, 26,709-722. Doi: 10.1016/j.sjbs.2017.11.003.
- [12]- **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*, 17,36-57.<https://doi.org/10.1186/s12934-018-0879-x>.
- [13]- **Duygu D C., Udoh A U., Özer T., İlkay A., ERKA Y.**, (2017), The Characteristics and Importance of Microalgae Culture Collections, *Review / Derleme*, 13,80-87.
- [14] - **Berberoglu H., Gomez P S., Pilon L.**, (2009), Radiation characteristics of *Botryococcus braunii*, *Chlorococccum littorale*, and *Chlorella* sp. used for CO₂ fixation and biofuelproduction, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 110, 1879–1893
- [15]- **Nabris K J E.**, (2012) The Science of algae. Faculty of science-department of marine sciences, The Islamic University of Gaza, 14, 61-76
- [16]- **Carlsson A.S., Van Beilen J.B., Moller R., Clayton D.**, (2007), Micro and macroalgae utility for industrial applications, UK :CPL Press, University of York, 82.
- [17] - **Mazard S., Penesyanyan A., Ostrowski M., Paulsen I T., Egan S.**, (2016), Tiny microbes with a big Impact: The role of Cyanobacteria and their metabolites in shaping Our future, *Marine Drugs*, 14, 97-116. Doi: 10.3390/md14050097.
- [18] - **Person J.**, (2014), Livre Turquoise Algues filières du futur, Adebitech, Romainville,4.
- [19]- **López A V., Ascencio F., Nuño K.**, (2017), Microalgae, a potential natural functional food source – a review, *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*,67, 4, 251–263. Doi: 10.1515/pjfn-2017-0017.
- [20] - **Bateman A.**, (2020), Division of labour in a matrix, rather than phagocytosis or endosymbiosis, as a route for the origin of eukaryotic cells. *Biology Direct*, 15 (8), 1-33. Doi: 10.1186 / s13062-020-00260-9
- [21]- **Anand V., Singh PK., Banerjee C., Pratyosh Shukla.**, (2017), Proteomic approaches in microalgae: perspectives and applications, *Biotech springer*, 7,197-207. Doi: 10.1007/s13205-017-0831-5.
- [22]- **Stock W., Pinseel E., Decker S., Sefbom J., Blommaert L., Chepurnova O., Koen S K., Vyverman W.**, (2018), Expanding the toolbox for cryopreservation of marine and freshwater diatoms, *Scientific Reports* ,8:4279-4288. Doi: 10.1038/s41598-018-22460-0.

Références bibliographiques

- [23]- **Pencreac H G., Ldevos M., Poisson L., Herault J., Loiseau C., Ergan F.,** (2004), Les microalgues marines : source alternative d'acide eicosapentaénoïque (EPA) et d'acide docosahexaénoïque (DHA), *oilseeds and Fat Corps and Lipid journal organismes*, 11, (2), 118-122, <http://dx.doi.org/10.1051/ocl.2004.0118>.
- [24]- **Yan N., Fan C., Chen Y., Hu Z.,** (2016), The potential for microalgae as bioreactors to produce pharmaceuticals, *International Journal of Molecular Sciences*, 17, 962-986. Doi: 10.3390/ijms17060962.
- [25]- **Barkia I., Nazamid Saari N., Manning S R.,** (2019), Microalgae for High-Value Products towards Human Health and Nutrition, *Marine Drugs* , 17, 304-333. Doi: 10.3390/md17050304.
- [26]- **Umen J G.,** (2014), Green algae and the origins of multicellularity in the plant kingdom. *Cold Spring Harb Perspect Biology*, 6, (11), 16170-16182. Doi: 10.1101/cshperspect. a016170.
- [27]- **Holzinger A, Pichrtová M.,** (2016), Abiotic Stress Tolerance of Charophyte Green Algae: New Challenges for Omics Techniques. *Front Plant Sciences*, 7, 678-690. Doi: 10.3389/fpls.2016.00678.
- [28]- **Cavalier S. T., Chao E. E., Lewis R.,** (2018), Multigene phylogeny and cell evolution of chromist infrakingdom Rhizaria: contrasting cell organisation of sister phyla Cercozoa and Retaria. *Protoplasma*. 255(5), 1517-1574. Doi: 10.1007/s00709-018-1241-1.
- [29]- **Xu K., Hu S., Tang X.,** (2019), The complete plastid genome of a marine microalgae *Cryptophyceae sp.* CCMP2293 (Cryptophyta), *Mitochondrial DNAPart B*, 4, (2), 2159-2160.
- [30] - **Moreira D., López G P.,** (2014), The rise and fall of Picobiliphytes: how assumed autotrophs turned out to be heterotrophs, *Bioessays*, 201, 36, (5), 468-474. Doi: 10.1002/bies.201300176.
- [31] - **Seenivasan R., Sausen N., Medlin L K., Melkonian M.,** (2013), *Picomonas judraskeda* gen. et sp. nov.: the first identified member of the Picozoa phylum nov., a widespread group of picoeukaryotes, formerly known as 'picobiliphytes', *PLoS One*, 2013, 8, (3), 59565-59972 doi:10.1371/journal.pone.0059565.
- [32]- **Alberola F M., Barreno E., Casano L M., Gasulla F., Molins A.,** (2019), Dynamic evolution of mitochondrial genomes in Trebouxiophyceae, including the first completely assembled mtDNA from a lichensymbiont microalga (*Trebouxia* sp. TR9), *Scientific Reports*, 9, 8209-8221 , <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44700-7>
- [33] - **Adl S M., Simpson A G B., Farmer M A., Andersen R A., Anderson O R.,** (2005), the new higher level classification of eukaryotes with emphasis on the taxonomies of protists, *J. Eukaryotic Microbiology*, 52(5), 399–451. Doi: 10.1111/j.1550-7408.2005. 00053. X

- [34] - **Asfour N Y.**, Production en masse de microalgues : optimisation des paramètres physico-chimiques, Thèse de doctorat, Université d'Oran, 2019, 10.
- [35]- **Barka A., Blecker C.**, (2016), Microalgae as a potential source of single-cell proteins. A review, *Biotechnology Agronomy Society. Environnement*, 20, (3), 427-436.
- [36]- **Bhalamurugan G .L, Valerie O., Mark L.**, (2018), Valuable bioproducts obtained from microalgal biomass and their commercial applications: A review, *Environmental Engineering Research*, 23 (3), 229-241 <https://doi.org/10.4491/eer.2017.220> eISSN 2005-968X.
- [37]- **Chu W L.**, (2012), Biotechnological applications of microalgae, *Review Article*, 6 (1 1), 24-37.
- [38]- **Sharma N., Sharma P.**, (2017), Industrial and Biotechnological Applications of Algae: A Review, *Journal of advances in plant biology*, 1, (1), 1-25. Doi: 10.14302/issn.2638-4469.japb-17-1534.
- [39]- **Chiaiese P., Corrado G., Colla G., Kyriacou M G., Rouphael Y.**, (2018), Renewable sources of plant biostimulation: Microalgae as a sustainable means to improve crop performance, *Frontiers in Plant Science*, 9, 1782-1788. Doi: 10.3389/fpls.2018.01782.
- [40]- **Dineshkumar R., Rasheeq A A., Arumugam A., Nambi K N., Sampathkumar P.**, (2019), Marine microalgal extracts on cultivable crops as a considerable bio-fertilizer: A Review, *Indian Journal of Traditional Knowledge*, 18, (4), 849-854.
- [41] Ronga D., Biazzi E., Parati K., Carminati D., Carminati E., Tava A., (2019), Microalgal biostimulants and biofertilisers in crop production, *agronomy Review*, 9, 192-2014. Doi: 10.3390/agronomy9040192.
- [42]- **Musa M., Ayoko G A., Ward A., Rösch C., Brown R J., Rainey T J.**, (2019), Factors Affecting microalgae production for biofuels and the potentials of chemometric methods in assessing and optimizing productivity, *cells Review*, 8, 851-876. Doi: 10.3390/cells8080851.
- [43]- **Klinthong W., Yang Y H., Huang C H., Tan C S.**, (2015), Microalgae and Their Applications in CO₂ Capture and Renewable Energy, *Aerosol and Air Quality Research*, 15, 712–742. Doi: 10.4209/aaqr.2014.11.0299.
- [44] - **Klinthong W., Yang Y H., Huang C H., Tan C S.**, (2015), Microalgae and Their Applications in CO₂ Capture and Renewable Energy, *Aerosol and Air Quality Research*, 15, 712–742. Doi: 10.4209/aaqr.2014.11.0299.
- [45]- **Medipally S R., Fatimah M., Yusoff F M D., Banerjee S., Shariff M.**, (2015), Microalgae as sustainable renewable energy feedstock for biofuel production, *Hindawi Publishing Corporation BioMed Research International*, 2015, 1-13, <http://dx.doi.org/10.1155/2015/519513>.

Références bibliographiques

- [46]- **Huët M A L., Puchooa D.**, (2017), Bioremediation of heavy metals from aquatic environment through microbial processes: A potential role for probiotics? *Journal of Applied Biology & Biotechnology*, 5(6), 14-23. Doi: 10.7324/JABB.2017.50603.
- [47]- **Tchounwou P B G., Yedjou C G., Patlolla A K., Sutton D J.**, (2012), Heavy metals toxicity and the environment, *NIH Public Access*, 101, 133–164. Doi: 10.1007/978-3-7643-8340-4_6.
- [48]- **Amira W., Leghouchi E.**, (2017), Assessment of heavy metal pollution in sediments and their bioaccumulation in *Phragmites australis* from Anil river (Jijel-Algeria), *Global Nest Journal*, 10, (10), 10-20.
- [49] - **Bhattacharya PT., Misra SR., Hussain M.**, (2016), Nutritional aspects of essential trace elements in oral health and disease: An extensive review, *Scientifica*, 2016, 54-64. Doi: 10.1155 / 2016/5464373.
- [50]- **Izah S C., Inyang I R., Angaye T C N., Okowa I P.**, (2017), A review of heavy metal concentration and potential health implications of beverages consumed in Nigeria, *toxics Review*, 5, 1-15. Doi: 10.3390/toxics5010001.
- [51]- **Ali H., Khan E., Ilahi I.**, (2019), Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: Environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation, *Hindawi Journal of Chemistry*, 2019, 1-14 <https://doi.org/10.1155/2019/6730305>.
- [52] - **Shen F., Mao L., Sun R., Du J., Tan Z., Ding M.**, (2019), Contamination Evaluation and Source Identification of Heavy Metals in the Sediments from the Lishui River Watershed, Southern China, *International Journal Environmental Research Public Health*, 16 (3), 336-35. Doi: 10.3390 / ijerph160303.
- [53]- **David M P., Tamsin A M.**, (2003), The importance of volcanic emissions for the global atmospheric mercury cycle, *Elsevier: Science Direct*, 7 (36), 5115-5124. Doi: [10.1016 / j.atmosenv.2003.07.011](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2003.07.011)
- [54] - **Onakpa M M., Njan A A., Kalu O C A.**, (2018), Review of heavy metal contamination of food Crops in Nigeria, *Annals of Global Health*, 84 (3), 488-494. Doi: 10.29024 / aogh.2314.
- [55]- **Yahya A I N., Mohamed S K., Mohamed A G.**, (2018), Environmental pollution by heavy metals in the aquatic ecosystems of Egypt, *Journal. of Toxicology*, 3, (1), 1-8. Doi: 10.19080/OAJT.2018.03.555603.

Références bibliographiques

- [56] - **Adesiyan I M., Bisi J M., Aladesanmi O T., Okoh A I., Ogunfowokan A O.,** (2018), Concentrations and human health risk of heavy metals in rivers in southwest Nigeria, *Journal of Health and Pollution*, 8 (19), 1-14. Doi: 10.5696 / 2156-9614-8.19.180907.
- [57] - **Tchounwou P B., Yedjou C G. , Patlolla A K., Sutton D J.,** (2012), Heavy metal toxicity and the environment , *Experientia Supplementum*, 101, 133-164. Doi: 10.1007 / 978-3-7643-8340-4_6.
- [58]- **Miazek K., Iwanek W., Remacle C., Richel A., Goffin D.,** (2015), Effect of metals metalloids and metallic nanoparticles on microalgae growth and industrial product biosynthesis: A review, *International Journal of Molecular Sciences*, 16, 23929-23969. Doi: 10.3390/ijms161023929.
- [59] - **Leonardo T.,** Mécanismes d'accumulation et impact biologique de l'argent et du cobalt chez la microalgue *Coccomyxa actinabiotis*, Thèse de doctorat, Université de Grenoble, France, 2014, 35.
- [60] - **Attiya N, Fattahi R, El-Haidani A, Lahrach N, Amarouch MY, Filali Y.,** (2020), Exposition au mercure et état de santé des médecins dentistes de deux régions du centre du Maroc: enquête transversale descriptive [Mercury exposure and dentists' health status in two regions of centrall Morocco: descriptive cross-sectional survey], *Pan African Medical Journal*, 36,110-123, Doi:10.11604/pamj.2020.36.110.19623
- [61] - **Degila H W., Azon N., Adounkep J G., Akowanou AV O., Aina M.,** (2019), Mercure: sources d'émission, toxicité, contamination du milieu aquatique et particularité du Benin Mercury: sources of emission, toxicity, contamination of aquatic environment and particularity of Benin republic, *International journal of biological and biochemical sciences*,13, (7), 3429-3448
- [62] - **Bernhoft R A.,** (2012), Mercury toxicity and treatment: a review of the literature, *Journal of Environmental and Public Health*. 2012, 460508-460518. doi:10.1155/2012/460508
- [63] - **Rahimzadeh M R., Kazemi S., Moghadamnia AA.,** (2014), Current approaches of the management of mercury poisoning: need of the hour, *Daru: journal of pharmaceutical sciences*, 22, (1):46-56. Doi: 10.1186/2008-2231-22-46
- [64]- **Jia S T., Lee S Y., C K L., Lam M K., lim J W., Shih H H.,** (2020), A review on microalgae cultivation and harvesting, and their biomass extraction processing using ionic liquids,*journal Bioengineered*,11,01,116-129 .doi.org/10.1080/21655979.2020.1711626.
- [65] - **Abdel-Raouf N., Al-Homaidan A A., Ibraheem I B.,** (2012), Microalgae and wastewater treatment, *Saudi Journal of Biologie Science*, 19, (3), 257-275. Doi: 10.1016 / j. sjbs.2012.04.005.

Références bibliographiques

- [66]- **Mondal M., Goswami S., Ghosh A., Oinam G.,** (2017), Production of biodiesel from microalgae through biological carbon capture: a review, *Biotechnology* ,7,99-120. Doi: 10.1007/s13205-017-0727-4.
- [67]- **Ting H., Haifeng L., Shanshan M., Zhang Y., Liu Z., Duan N.,** (2017), Progress in microalgae cultivation photobioreactors and applications in wastewater treatment: A review, *International Journal Agriculture and Biotechnology Engineering*, 10, (1), 1-29.
- [68]- **Shen Y., Yuan W., Pei Z. J., Wu Q., Mao E.,** (2009), Microalgae mass production methods , *Society of Agricultural and Biological Engineers*, Vol. 52(4): 1275-1287
- [69]- Benemann J, 2013, Microalgae for biofuels and animal feeds, *Energies*, 6, 5869-5886; doi: 10.3390/en6115869
- [70]- **Xu L., Weathers P J., Xiong X R., Liu C Z.,** (2009), Microalgal bioreactors: Challenges and opportunities, *Engineering in Life Sciences*, 9, (3), 178–189. Doi: 10.1002/elsc.200800111.
- [71] - **Lucchetti A.,** Modélisation et conception d'un système deculture de microalgues ,Génie des procédés, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris,France, 2014, 22
- [72] -**Demirbas, A. Demirbas, M F.,** (2010). *Algae Energy - Algae as a new source of biodiesel.* Springer Science & Business Media, 199.
- [73] -**Andersen R.,** *Algal culturing techniques,* Elsevier academic press, 2005, 578
- [74]- **Sharma M., Thukral1 N., Soni1 N K., Maji S.,** (2015), Microalgae as Future Fuel: Real opportunities and challenges, *Journal of Thermodynamics and Catalysis*, 6, (1). Doi: 10.4172/2157-7544.1000139.
- [75]- **Blinova L., Bartosova A., Gerolunova K.,** (2015), Cultivation of microalgae (*Chlorella vulgaris*) for biodiesel production, *Research papers faculty of materials sciences and technology in Trnava*,23,(36),87-95.
- [76]- **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*, 17,36-57.<https://doi.org/10.1186/s12934-018-0879-x>
- [77] - **Pedruzi G O., Amorim M L., Santos R R., Martins M A., Vaz G.,** (2020), Biomass accumulation-influencingfactors, *Microalgae Farms*, 24,134-139. Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi>.
- [78]- **Ras M., Steyer J P., Bernard O.,** (2013), Temperature effect on microalgae: a crucial factor for outdoor production. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, Springer, 12, (2), 153-164.

- [79]- **Show P L., Tang M S., Nagarajan D., Ling T C., Chien W C W., Chang J S.,** (2017), A Holistic Approach to Managing Microalgae for Biofuel Applications, *International Journal of Molecular Sciences Review*, 18, 215-249, doi:10.3390/ijms18010215.
- [80]- **El-Naggar A H., Sheikh H M.,** (2014), Response of the green microalga *Chlorella vulgaris* to the oxidative stress caused by some heavy metals, *Life Science Journal*, 11, (10), 1349-1357. Doi:10.7537/marslsj111014.197.
- [81]- **Mohy El-Din S M.,** (2016), Effects of heavy metals (Copper, Cobalt and Lead) on the growth and photosynthetic pigments of the green alga *Chlorella pyrenoidosa* H. chick, *The Egyptian society for environmental sciences*, 15 (1), 01-10.
- [82]- **Arunakumara K I L., Xuecheng Z.,** (2008), Heavy metal bioaccumulation and toxicity with special reference to microalgae, *Oceanic and Coastal Sea Research*, 7, (1), 25, 30.
- [83] - **Carfagna S., Lanza N., Salbitani G., Basile A., Sorbo S., Vona V.,** (2013), Physiological and morphological responses of Lead or Cadmium exposed *Chlorella sorokiniana* 211-8K (Chlorophyceae) , *Springer plus*, 2, (1): 147-159. Doi: 10.1186 / 2193-1801-2-147).
- [84]- **Kondzior P., Butarewicz A.,** (2018), Effect of heavy metals (Cu and Zn) on the content of photosynthetic pigments in the cells of algae *Chlorella vulgaris*, *Journal of Ecological Engineering*, 19, (3), 18-28, <https://doi.org/10.12911/22998993/85375>.
- [85]- **Jyoti J., Awasthi M.,** (2014), Bioremediation of wastewater chromium through microalgae: A review, *International Journal of Engineering Research and Technology*, 3, (6), 1210-1215.
- [86]- **Shanab S., Essa A., Shalaby E.,** (2012), Bioremoval capacity of three heavy metals by some microalgae species (Egyptian Isolates), *Plant Signaling & Behavior*, 7, (3), 1-8.
- [87] - **Sialve B., Steyer J P.,** (2013), Les microalgues, promesses et défis, *Innovations Agronomiques*, 26, 25-39.
- [88]- **Monika B., Alka S., Srivastava J K., Palsania J.,** (2014), Biosorption of heavy metals from wastewater by Using Microalgae, *International Journal of Chemical and Physical Sciences*, 3,(6), 67-81.
- [89]- **Sati M., Verma M., Bora M., Rai J P N.,** (2016), Potential of algae in bioremediation of heavy metals: A review, *Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences*, 5, (11), 86-97.
- [90]- **Abdi O., Kazemi M.,** (2015), A review study of biosorption of heavy metals and comparison between different biosorbents, *Journal of Material and Environmental Sciences*, 6 (5), 1386-1399.
- [91]- **Sibi G.,** (2014), Biosorption of arsenic by living and dried biomass of fresh water microalgae - potentials and equilibrium studies, *Journal of Bioremediation and Biodegradation*, 5, (6), 249-257. Doi: 10.4172/2155-6199.1000249.

Références bibliographiques

- [92]- **Patrick D P., Mahadevan R., Yakunin A F.,** (2018), Heavy metal removal by bioaccumulation using genetically engineered microorganisms, *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 6, 157-177. Doi: 10.3389/fbioe.2018.00157.
- [93] - **Salaudeen A O,** (2019), Biosorption of heavy metals: A mini review, *Acta scientific agriculture*, 3, (2), 22-25.
- [94]- **Salam K A.,** (2019), Towards sustainable development of microalgal biosorption for treating effluents containing heavy metals. *Biofuel Research Journal*, 22, 948-961. Doi: 10.18331/BRJ2019.6.2.2.
- [95]- **Kejriwal R., Mandke M., Ingle P.,** (2018), Biosorption of heavy metals, *International Journal of Advanced Research in Chemical Science*, 5, (11), 32-42. Doi: <http://dx.doi.org/10.20431/2349-0403.0511004>.
- [96]- **Tang Y Z., Gin K H G., Aziz M A.,** (2003), The relationship between pH and heavy metal ion sorption by algal biomass, *Adsorption Science and Technology*, 21, (6), 526-537.
- [97]- **Dwivedi S.,** (2012), Bioremediation of heavy metal by algae: Current and future perspective, *Journal of Advanced Laboratory Research in Biology*, 3, (3), 196-199.
- [98]- **Sibi G.,** (2019), factors influencing heavy metals removal by microalgae, *Journal of Critical Reviews*, 6, (6), 29-32.
- [99]- **Świątek M Z., Ryga A.,** (2017), The effect of biomass (*Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus armatus*) concentrations on Zn²⁺, Pb²⁺ and Cd²⁺ biosorption from Zinc smelting wastewater, *Engineering and Protection of Environment*, 20, (2), 211-220. Doi: 10.17512/ios.2017.2.6.
- [100] - **John S G.,** (2002), Biomagnification dans les systèmes marins: le point de vue d'un écologiste, *Marine Pollution Bulletin*, 45, (1), 6-52. Doi: 10.1016 / S0025-326X (01) 00323-X.
- [101]- **Rao P R., Bhargavi Ch.,** (2013), Studies on biosorption of heavy metals using pretreated biomass of fungal species, *International Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 3, (3), 171-180.

Adaptation des microalgues aux métaux lourds : techniques de culture et procédés de bioremédiation.

Membres de Jury :

Présidente : Dr. Ouled haddar H.

Examineur : Dr. Laib E.

Encadreur: Mme. Benhamada O.

Présenté par :

Aries Fatma Zohra

Mellit Assia

Labiad Hind

Résumé

Les activités industrielles génèrent de grandes quantités d'eau contaminée particulièrement par les métaux lourds. A cause de leur non biodégradabilité, ces métaux causent des sérieux problèmes induisant un déséquilibre des écosystèmes aquatiques. Plusieurs méthodes conventionnelles sont utilisées pour éliminer les métaux lourds, mais en revanche, elles génèrent des polluants secondaires. L'exploitation de la biomasse microalgale dans l'élimination des métaux lourds est une technologie intéressante à cause de sa grande capacité de liaison aux métaux lourds. En effet, grâce à de nombreux phénomènes biologiques comme la biosorption et la bioaccumulation, les microalgues ont développé un large éventuel de mécanismes pour faire face à la toxicité des métaux lourds. Actuellement, la culture des microalgues par des systèmes fermés et /ou ouverts est considérée comme une technologie commercialement fiable impliquant des approches stratégiques multidisciplinaires.

Notre étude avait pour objectifs d'étudier les mécanismes de résistance et les stratégies d'adaptation des microalgues aux métaux lourds, et donc de fournir une référence pour une meilleure utilisation dans le traitement des eaux usées et l'élimination des métaux lourds.

Mots clés : microalgues, métaux lourds, biosorption, bioaccumulation, systèmes fermés, systèmes ouverts, eaux usées.

Abstract

Industrial activities generate large quantities of water contaminated particularly by heavy metals. Because of their non-biodegradability; these metals cause serious problems inducing an imbalance in aquatic ecosystems. Several conventional methods are used to remove heavy metals, but on the other hand, they generate secondary pollutants. The exploitation of microalgae biomass for the removal of heavy metals is an interesting technology because of its great capacity for binding to heavy metals. Indeed, informal many biological phenomena such as biosorption and bioaccumulation, microalgae have developed a possible mechanism to deal with the toxicity of heavy metals. Currently, the cultivation of microalgae by closed and / or open systems is considered to be a commercially fiable technology involving strategic multidisciplinary approaches.

Our study aimed to study the resistance mechanism and adaptation strategies to heavy metals, and therefore to provide a benchmark a better use in wastewater treatment and heavy metal removal.

Key words: microalgae, heavy metals, biosorption, bioaccumulation, closed systems, open systems, wastewater

ملخص

تولد الأنشطة الصناعية كميات كبيرة من المياه الملوثة خاصة بالمعادن الثقيلة ، بسبب عدم قابليتها للتحلل البيولوجي ؛ تسبب هذه المعادن مشاكل خطيرة تؤدي إلى اختلال التوازن في النظم البيئية المائية. تُستخدم عدة طرق تقليدية لإزالة المعادن الثقيلة ، ولكنها من ناحية أخرى تولد ملوثات ثانوية. يعد استغلال الكتلة الحيوية للطحالب الدقيقة لإزالة المعادن الثقيلة تقنية مثيرة للاهتمام بسبب قدرتها الكبيرة على الارتباط بالمعادن الثقيلة. في الواقع ، بفضل العديد من الظواهر البيولوجية مثل الامتصاص البيولوجي والتراكم البيولوجي ، طورت الطحالب الدقيقة مجموعة واسعة محتملة من الآليات للتعامل مع سمية المعادن الثقيلة. في الوقت الحالي ، تعتبر زراعة الطحالب الدقيقة عن طريق أنظمة مغلقة و / أو مفتوحة تقنية مجدية تجارياً تتضمن مناهج استراتيجية متعددة التخصصات هدفت دراستنا إلى دراسة آلية المقاومة واستراتيجيات التكيف مع المعادن الثقيلة ، وبالتالي توفير مرجع للاستخدام الأفضل في معالجة مياه الصرف الصحي وإزالة المعادن الثقيلة الكلمات المفتاحية: الطحالب الدقيقة ، المعادن الثقيلة ، الامتصاص الحيوي ، التراكم الحيوي ، الأنظمة المغلقة ، الأنظمة المفتوحة ، مياه الصرف الصحي