



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد الصديق بن يحيى - جيجل

Université MohammedSeddik Ben Yahia –Jijel

Faculté des Sciences de la Nature et de la vie

كلية العلوم الطبيعية والحياة

Département de Biologie Moléculaire et Cellulaire والخلوية قسم البيولوجيا الجزيئية

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme : **Master Académique En Biologie**

Filière : Sciences Biologiques

Option : Toxicologie Fondamentale et Appliquée

Thème

Effets toxiques des métaux lourds sur les microalgues aquatiques

Membres de Jury Réalisé par

Présidente : Dr. OUNAS I.

MESSAHLI Imane

Examineur: Dr. ZOUAGHI F.

SAIDANI Assia

Promotrice : Mme. BENHAMADA O.

SALMI Lynda

Année universitaire :2019-2020

Numéro d'ordre (bibliothèque) :

Remerciements

Au terme de notre travail nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage et la patience de réaliser ce travail.

Nous tenons à adresser nos remerciements les plus vifs d'abord à notre promoteur Mme. BENHAMADA O. Qui a accepté de nous encadrer.

Nos sincères considérations et remerciements sont également exprimés aux membres de jury : Dr. OUNAS I. Qui nous a fait honneur par sa présence en qualité de président de jury, et

Dr. ZOUAGHI F. qui est accepté d'examiner ce travail et de consacrer de leurs temps pour son évaluation.

Enfin, nos remerciements s'adressent à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

*Je dédie ce travail à : Mes très chers parents papa **Bachir** qui m'a encouragé et soutenu dès mon plus jeune âge. Grâce à son effort et son don que je suis arrivé jusqu' ici. Maman **Dalila**, qui est la lumière de ma vie, et qui a attendu avec Patience le fruit de sa bonne éducation. C'est grâce à elle et grâce à ses sacrifices que je suis là aujourd'hui. Merci pour votre soutien continu.*

*A Mes chers et adorables frères **Zakaria** et sa femme **wafa**, **Yacine** et mes sœurs **Meriem** et **Hadjers** sans oublier **Hiba**, **Inssaf** et **Batoul**.*

A Toute ma famille paternelle et maternelle. A mes oncles et tantes. Mes cousins et mes cousines sans exception.

*A mes amies et sœurs **Imane** et **Lynda** qui nous avons partagé à la fois le doux et l'amer dans ce travail.*

*Je le dédie aussi à toute la famille **Saidani** et **Boudiabe** petits et grands. Un grand merci à toutes mes amies -chacune avec son nom- avec qui j'ai passé d'inoubliables moments. Et à toute personne qui m'a encouragé durant mon parcours. A tous mes camarades de biologie et surtout de master 2 **Toxicologie fondamentale et Appliquée (2020)***

Assia

Dédicaces

À MES CHÈRES PARENTS : mon père Aïssa et ma chère mère Nacira. Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être.

Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours.

A mon seul frère : Akram que j'adore

A Mes chers et adorables sœurs Malak et Maroua, je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès et que Dieu, le tout puissant, vous protège et vous garde.

A Mes grands- parents, à mes chers oncles et mes chères tantes surtout tantes kamilla, fadila .

A mes amies et sœurs Assia et Lynda qui nous avons partagé à la fois le doux et l'amer dans ce travail.

À tous les membres de la famille Messahli ET Lagab, petits et grands. Un grand merci à toutes mes amies -chacune avec son nom- avec qui j'ai passé d'inoubliables moments. Et à toute personne qui m'a encouragé durant mon parcours. A tous mes camarades de biologie et surtout de master 2 Toxicologie fondamentale et Appliquée (2020)

Imane

Dédicaces

A la lumière de ma vie, mes parents :

*A la personne la plus chère dans ce monde, à « Mon père **Abd el hamid**» pour sa tendresse, son encouragement, son dévouement et son soutien tout au long de ces longues années d'études. Qu'il trouve ici l'expression de ma gratitude.*

*A la femme qui m'a encouragée, aidée et guidée dans le chemin de la vie « Ma mère **Dalila** » source d'amour, de tendresse bijoux de ma vie, « Maman je t'aime ».*

*A mes frères : **Souhilet** sa femme **karima**, **Rida**, **Brahim**. Sans oublier ma sœur aînée **Nassima** et notre petite princesses **alssabil** pour leur soutien continu.*

*A mes amies et sœurs **Assia** et **Imane** qui nous avons partagé à la fois le doux et l'amer dans ce travail.*

*Je le dédie aussi à toute la famille **Salmi** et **Chaabani**, petits et grands. Un grand merci à toutes mes amies -chacune avec son nom- avec qui j'ai passé d'inoubliables moments. Et à toute personne qui m'a encouragé durant mon parcours. A tous mes camarades de biologie et surtout de master 2 **Toxicologie fondamentale et Appliquée (2020)***

Lynda

Sommaire

Liste des abréviations.....	i
Liste des figures	ii
Liste des tableaux.....	iii
Introduction	1

Chapitre I : Généralités sur les microalgues

I.1 Définition et différents types d'algues	3
I.1.1. Les macroalgues.....	3
I.1.2. Les micro-algues	3
I.2. Bases de classification d'algues.....	4
I.2.1. La pigmentation	4
I.2.1.1. Les Chlorophylles	4
I.2.1.2. Les phéopigments	5
I.2.1.3. Les caroténoïdes.....	5
I.3. Les grands groupes des microalgues	5
I.3.1. Les Chlorophycées.....	5
I.3.2. Les rhodophycées	5
I.3.3. Les Euglenophycées.....	6
I.3.4. Les Cyanophycées	6
I.4. Reproduction des algues	7
I.5. Paramètres influençant la croissance des microalgues	7
I.5.1. La température	8
I.5.2 la lumière	8
I.5.3. La composition et l'agitation de l'eau.....	8
I.6. Composition biochimique des microalgues	8
I.7. Utilisation des microalgues	9

I.7.1. Utilisation thérapeutique.....	9
I.7.1.1. Activité antimicrobienne.....	9
I.7.1.2. Action anticoagulante	9
I.7.1.3. Activité antidiabétique	9
I.7.1.4. Cytotoxicité et activité antiprolifératrice	10
1.7.2. Utilisation alimentaire	10
I.7.3. Utilisation comme engrais.....	10
I.7.4. Elimination des métaux.....	10
I.7.4.1. Adsorption.....	11
I.7.4.2. Assimilation	11
I.7.5. Utilisation pour la bio-fixation de CO ₂	11
I.7.6. Utilisation des microalgues comme bio indicateurs de la pollution	11
I.8. Les algues nuisibles	11

Chapitre II : Généralités sur les métaux lourds

II.1. Définition.....	13
II.2. Caractéristiques physico-chimiques des métaux lourds	13
II.3. Origine des métaux lourds	14
II.3.1. Sources naturelles	14
II.3.2. Sources anthropiques	15
II.4. Classification biologique des métaux lourds	15
II.4.1. Les éléments traces essentiels	15
II.4 .2. Les éléments traces non essentiels.....	15
II.5. Utilisation des métaux lourds	16
II.6. Contamination des écosystèmes aquatiques par les métaux lourds.....	16
II.7. Élimination des métaux lourds dans les écosystèmes aquatiques.....	17
II.8. La Spéciation des métaux lourd.....	17

II.9. Biodisponibilité des métaux lourds	17
II.10. Bioaccumulation des métaux lourds	18
II.11. Bioamplification des métaux lourds	19

Chapitre III : toxicité des métaux lourds

III.1. L'importance de la concentration dans la toxicité métallique.....	21
III.2. Effets toxiques des métaux lourds sur l'homme	22
III.3. Effets toxiques des métaux lourds sur l'écosystème aquatique	23
III.4. Effets toxiques des métaux lourds sur les microalgues.....	24
III.4.1. Bioaccumulation des métaux lourds dans les microalgues.....	24
III.4.2. Formes des métaux lourds dans les microalgues	24
III.4.3. Mécanismes de toxicité des métaux lourds chez les microalgues.....	24
III.4.3.1. Interaction avec les protéines et l'ADN	25
III.4.3.2. Accumulation des dérivés réactifs de l'oxygène et stress oxydant	25
III.4.4. Effets toxiques des métaux lourds sur la croissance des microalgues.....	25
III.4.5. Effets toxiques sur la photosynthèse	27
III.4.5.1. Le cas de cadmium	27
III.4.5.2. Le cas de cuivre.....	27
III.4.5.3. Le cas de zinc.....	28
III.4.5.4. Le cas d'argent	28
III.4.5.5. Le cas de cobalt.....	28
III.4.6. Effet du stress oxydatif provoqué par les métaux lourds sur les microalgues.....	29
III.4.7. Déséquilibre de la balance ionique des microalgues par les métaux lourds	30
III.4.8. Toxicité des métaux lourds au niveau ultra structural.....	30
III.4.8.1. Le cas de cadmium.....	30
III.4.8.2. Le cas de sélénium	30
III.4.8.3. Le cas de zinc	31

III.5. La tolérance des microalgues aux métaux lourds	31
III.5.1. Les Mécanismes limitant l'entrée des métaux dans la cellule	32
III.5.1.1. Complexation des ions métalliques à la surface de la cellule	32
III.5.1.2 Exclusion des métaux lourds par modification de la structure de la paroi Cellulaire ou de la membrane plasmique	32
III.5.1.3. Complexation extracellulaire par sécrétion des ligands.....	32
III.5.2. Mécanismes d'excrétion des métaux lourds.....	32
III.5.3. Mécanismes de gestion des métaux incorporés : chélation et compartimentation subcellulaire.....	33
Conclusion.....	34
Références bibliographiques.....	35

Liste d'abréviation

Ag	Argent
Al	Aluminium
As	Arsenic
BAC	facteur de bioconcentration
BAF	facteur de bioaccumulation
Cd	Cadmium
Cd (2+)	Ion de cadmium
Ce	Cérium
CIRC	Centre International de Recherche sur le Cancer
Cr	Chrome
Cu	Cuivre
ETM	Éléments traces métalliques
ETMPT	Éléments traces métalliques potentiellement toxiques
Hg	Mercure
Hg (2+)	Ion de mercure
Mn	Manganèse
Ni	Nickel
Pb	Plomb
Pb (2+)	Ion de plomb
PbCl₂	Le chlorure de plomb
PbCO₃	Carbonate de plomb
Pd	Palladium
Ph	Potentiel Hydrogène
pg/cellule	picogramme par cellule
ROS	Les espèces réactives de l'oxygène

Sn	Étain
Ti	Titane
Z	Nombre atomique
Zn	Zinc

Liste des figures

Figure 01 : Diversité morphologique des microalgues	4
Figure 02 : photographie d'une Chlorophycée <i>Chlorella vulgaris</i>	5
Figure 03 : Photographie d'une Rhodophycée <i>Rhodospirillum rubrum</i>	6
Figure 04 : Photographie d' <i>Euglenophycée Euglena</i>	6
Figure 05 : Photographie d'une Cyanobactérie <i>Anabaena</i>	7
Figure 06 : Biodisponibilité et bioaccumulation des contaminants dissous dans le milieu aquatique	17
Figure 07 : Bioamplification du mercure dans le réseau trophique	18
Figure 08 : Courbe dose-réponse générale pour les éléments traces métalliques essentiels, et les éléments traces métalliques non essentiels	20
Figure 09 : <i>Alexandrium catenella</i> observée au microscope	26
Figure 10 : a. algue contrôle : Cellule typique de <i>Chlamydomonas reinhardtii</i> obtenue par microscopie électronique à transmission. b. algue exposée au sélénium ayant formé des granules	31

Liste des tableaux

Tableau I : Compositions biochimiques desmicro-algues	9
Tableau II : Caractéristiques physicochimiques des principaux métaux lourds.....	13
Tableau III : Principales utilisations des métaux lourds	15
Tableau VI : Effet de principaux métaux lourds sur la santé humaine.....	21
TableauV : Effet de principaux métaux lourds sur la croissance des microalgues.....	24

Introduction

Le milieu aquatique représente un enjeu considérable, en termes de développement socio-économique, il correspond à un espace d'activités intenses (industrielles, agricoles, domestiques etc...) et constitue de ce fait, le réceptacle de quantités importantes de substances d'origine naturelles ou anthropiques dont un grand nombre possède des propriétés toxiques (Marchand, 1989; Benguedda-rahhal, 2012).

Parmi les substances chimiques susceptibles de constituer un danger pour la vie aquatique en générale, nous signalons les métaux lourds comme le plomb, le cadmium, le mercure, l'arsenic, et l'argent qui sont très toxiques et de plus en plus utilisés dans le secteur industriel (Hlavay et al. 2001). Leur nocivité est liée à leur rémanence et à leur spéciation. Les métaux lourds sont peu métabolisés à l'inverse des polluants organiques (Duquesne, 1992).

Les métaux lourds présents dans l'eau et les sédiments sont absorbés par les plantes et les animaux aquatiques, le dépassement d'une quantité donnée dans ces organismes provoque leur accumulation et passent à travers la chaîne trophique. Ils peuvent atteindre des concentrations qui altèrent la survie de certaines populations naturelles (Benguedda-rahhal, 2012). Au cours de leur métabolisme, ces éléments peuvent se transformer, et devenir dangereux pour la santé humaine en provoquant des effets perturbateurs sur le système nerveux, la circulation sanguine, le système immunitaire et la reproduction (Loez et al., 1998; Kalia et Flora, 2005).

Les études conduites sur les eaux contaminées par les métaux lourds ont révélé une diminution de la productivité et de la biodiversité, et des modifications qualitatives et quantitatives des peuplements, ces effets toxiques sont observés au-delà de certaines concentrations de ces polluants (Granum et al., 2005).

Dans les milieux marins, les organismes photosynthétiques représentés particulièrement par les microalgues constituent la base des réseaux trophiques et fournissent aux consommateurs des chaînes alimentaires l'énergie chimique accumulée grâce à la photosynthèse (Granum et al., 2005)

Les micro-algues sont des micro-organismes végétaux unicellulaires et photosynthétiques vivant en milieu aquatique. Du fait de leur grande variabilité morphologique, on les classe en différentes catégories : les algues bleues, les algues brun-jaunes, les algues rouges et les algues vertes (Doré-Deschênes, 2009). Elles sont retrouvées sur la totalité du globe, dans tous les milieux aquatiques (eaux marines, eaux douces, eaux saumâtres). Elles possèdent, malgré leur grande variabilité, des points communs en particulier concernant leur structure et leur métabolisme (Cadoret et Bernard, 2008).

L'exposition de ces organismes à des concentrations élevées en métaux induit une inhibition de la croissance, une perturbation de la photosynthèse et d'autres fonctions physiologiques (Nguyen-Deroche, 2008).

Notre recherche bibliographique est visée principalement à étudier la toxicité des métaux lourds les plus toxiques (Cd, Pb, Hg, As, Ag, Cu, Zn) sur l'Homme et l'écosystème mais particulièrement sur les microalgues.

Pour réaliser ce travail, on a organisé notre mémoire en trois chapitres : le premier donne des généralités sur les microalgues à savoir leur classification, leur composition biochimique, leurs écologies et leurs larges domaines d'utilisation. Le deuxième chapitre présente des généralités sur les métaux lourds, leurs caractéristiques physico-chimiques, leurs sources, leurs utilisations et la contamination des écosystèmes aquatiques par eux. Alors que le dernier est consacré à la présentation de la toxicité des métaux lourds sur l'Homme et l'écosystème aquatique en précisant leurs effets toxiques sur différents paramètres chez les microalgues (croissance, photosynthèse, stress oxydatif, équilibre de la balance ionique, et sur le niveau ultra structural).

Chapitre I :
Généralités sur les
microalgues

I.1 Définition et différents types d'algues

Les algues peuvent être définies comme des organismes inféodés aux zones humides, le plus souvent photosynthétiques. Les algues incluent les macroalgues benthiques, marines ou d'eau douce, et un ensemble d'organismes microscopiques marins ou d'eau douce, planctoniques, benthiques, qualifiés de microalgues (Pencreac'h et al., 2004) qui présentent un appareil végétatif peu évolué (sans racine, ni tige, ni feuille). Leurs organes de reproduction sont des cystes : sporocystes et gamétocystes qui sont des structures cellulaires renfermant respectivement les spores et gamètes et dont l'appareil végétatif relativement simple est appelé « thalle », relativement simple est appelé « thalle ». Le thalle contient une structure à sa base (rhizoïdes, crampons, disques...) permettant l'ancrage de l'algue sur un support : une roche (algues épilithes), ou une plante (algues épiphytes), ou un animal (algues épibiontes) ou parfois même le sable (Amirouche et al., 2009).

I.1.1. Les macroalgues

Les macroalgues sont des algues multicellulaires de taille proche du centimètre et qui croissent le plus souvent dans des bassins naturels d'eau douce ou d'eau salée. Ces organismes sont nécessaires aux écosystèmes côtiers en termes de composition, fonction et productivité. On distingue principalement trois groupes de macroalgues différenciés selon leur pigmentation : rouge, verte et marron (Filali, 2012).

I.1.2. Les micro-algues

Les micro-algues sont des micro-organismes végétaux unicellulaires et photosynthétiques vivant en milieu aquatique, malgré leur grande variabilité, elles présentent des points communs en particulier concernant leur structure et leur métabolisme (Cadoret et Bernard, 2008).

Ces microorganismes photosynthétiques sont considérés comme les premiers producteurs d'oxygène indispensable à la respiration de la majorité des êtres vivants. Ils sont à l'origine de la transformation de la composition atmosphérique (fixation de CO₂ et rejet d'O₂) et ont permis la vie végétale et animale sur notre planète (Pencreac'h et al., 2004).

La majorité des micro-algues sont dites photo-autotrophes ou autotrophes. Elles tirent leur énergie de la lumière par photosynthèse et leur principale source nutritive est le CO₂ en solution dans l'eau. En effet, ces microorganismes sont à l'origine de l'équilibre de la composition atmosphérique dont la fixation de dioxyde de carbone et le rejet d'oxygène et contribuent ainsi à la continuité de la vie animale et végétale (Ben Amor, 2015).

I.2. Bases de classification d'algues

Les scientifiques ont analysé les micro-algues pour les distinguer et les diviser en plusieurs classes (figure 01) selon des critères généraux comme la pigmentation, la structure biologique et le métabolisme (Sasson,1998).

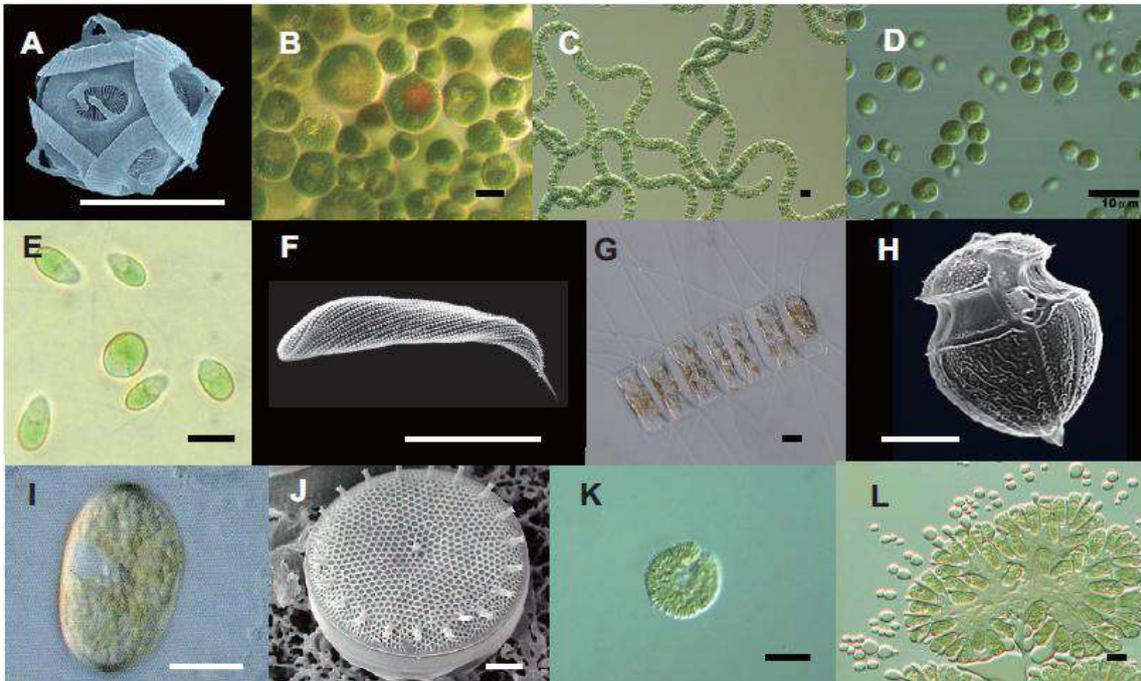


Figure 1 : Diversité morphologique des microalgues (Filali, 2012)

A : *Gephyrocapsa* E : *Dunaliella tertiolecta* J : *Bacillariophyceae*
B : *Haematococcus lacustris* F : *Chaetoceros calcitrans* K : *Raphidophyceae*
C : *Spirulina platensis* H : *Dinophysis acuminata* L : *Botryococcus*
D : *Chlorella vulgaris* I : *Alexandrium*
La longueur du trait dans chaque figure est égale à 10µm.

I.2.1. La pigmentation

Les pigments constituent un critère important dans la classification des algues. Le rôle physiologique de ces molécules est de capter l'énergie lumineuse (Sasson,1998).

I.2.1.1. Les Chlorophylles

Les chlorophylles sont des molécules solubles dans les solvants organiques et conférant la couleur verte aux chloroplastes. Ces molécules impliquées dans les processus d'oxydoréduction photochimique des milieux biologiques assurent d'une part la collecte énergétique des photons, et d'autre part le transfert d'énergie permettant ainsi la transformation du dioxyde de carbone et de l'eau en molécules organiques. À l'origine de la photosynthèse, toutes les algues possèdent de la chlorophylle *a*. Malgré cette caractéristique commune, certains phylums se distinguent par la présence de chlorophylles *b* ou *d*. Les algues

vertes renferment, comme les plantes supérieures et contrairement aux autres algues, de la chlorophylle *b* tandis que les algues rouges possèdent une faible quantité de la chlorophylle *d* (Genèves, 1992).

I.2.1.2. Les phéopigments

Les phéopigments sont issus de la dégradation des chlorophylles (Antia et Cheng, 1982).

I.2.1.3. Les caroténoïdes

Les caroténoïdes sont constitués de deux classes de composés : les carotènes et les xanthophylles. Les premiers sont des molécules terpéniques pouvant être assimilés à la condensation de chaînes de 20 carbones. Les seconds découlent de l'oxydation progressive des carotènes (Antia et Cheng, 1982).

I.3. Les grands groupes des microalgues

I.3.1. Les Chlorophycées

Les algues vertes ou ulvophytes sont un ensemble d'algues dont les pigments essentiels à la photosynthèse sont les chlorophylles *a* et *b*. Les plastes de ces algues sont colorés en vert par ces pigments, auxquels des caroténoïdes sont quelquefois associés. Elles sont présentes en majorité dans les eaux douces et dans les mers et les océans cependant quelques espèces peuvent être retrouvées sur terre. Les algues vertes sont très riches en calcium et en protéines, possèdent un pouvoir nutritionnel élevé (Garon-Ladiere, 2004). La figure 02 montre un exemple de chlorophycée.

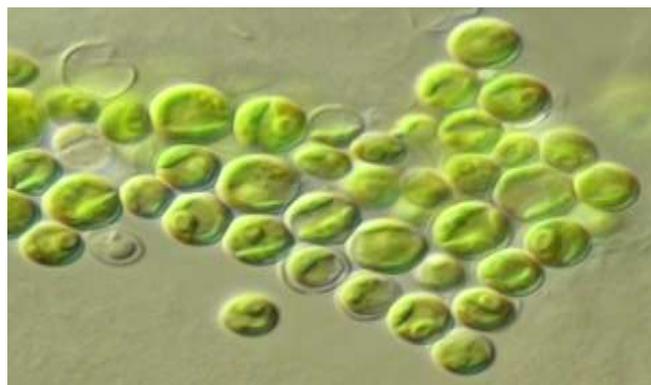


Figure 02 : photographie d'une Chlorophycée *Chlorella vulgaris*
(http://botany.natur.cuni.cz/algo/CAUP/H1955_Chlorella_vulgaris.htm)

I.3.2. Les rhodophycées

Les rhodophycées (figure 03) représentent les algues rouges ; il en existe près de 4000 espèces qui se développent essentiellement dans les eaux saumâtres voire salées. La plupart

derhodophycées sont des organismes photo-autotrophes qui ont besoin de lumière et de CO₂ pour se développer (Pulz et Gross, 2004).

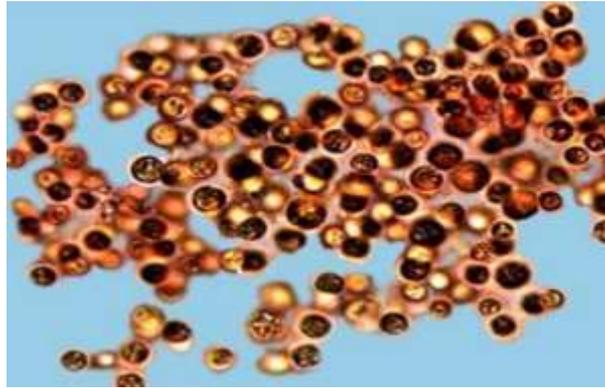


Figure 03: Photographie d'une Rhodophycée
Rhodospirillum rubrum (<http://www.ecosociosystemes.fr>)

I.3.3. Les Euglenophycées

Elles sont aussi nommées phéophycées. Il existe 1500 espèces différentes d'algues brunes; ce sont les algues marines les plus abondantes. On les retrouve surtout au niveau des côtes rocheuses à faible profondeur. Elles possèdent toutes une structure pluricellulaire et leur couleur jaunâtre à brune est due à l'abondance de la xanthophylle et de la fucoxanthine, qui dominent les autres pigments comme la chlorophylle a et c. Elles sont riches en alginates et en phlorotanins à propriétés antioxydants (Wijesinghe, 2011). La figure 4 donne un exemple d'euglenophycées.



Figure 04 : Photographie d'Euglenophycée *Euglena*
(<https://fr.wikipedia.org/wiki/Euglenophyceae>)

I.3.4. Les Cyanophycées

Les cyanophycées appelées également cyanobactéries, sont des micro-algues procaryotes de coloration bleu-vert de petites tailles (10 µm) (figure 05) qui peuvent se développer dans

quasiment tous les habitats : eaux douces, salées, saumâtres et également dans les sols. La seule exigence des Cyanophycées est la présence obligatoire de lumière c'est pourquoi on les considère comme des organismes autotrophes obligatoires. De façon générale, elles emmagasinent principalement leur énergie sous forme d'amidon ou encore sous forme de lipides (Pulz et Gross, 2004).



Figure 05 : Photographie d'une Cyanobactérie *Anabaena* (<http://www.dr-ralf-wagner.de>)

I.4. Reproduction des algues

Il existe deux types de reproduction chez les microalgues soit asexuée par la fragmentation (le thalle se sépare en deux parties qui redonneront chacune un nouveau thalle) ou sporulation (des spores peuvent être formées dans les cellules végétatives ordinaires ou dans des structures spécialisées appelées sporanges) ou bien par scission binaire (division du noyau puis du cytoplasme). Dans la reproduction sexuée, il y a fusion de gamètes mâle et femelle pour produire un zygote diploïde. Des œufs se forment dans les cellules réceptrices identiques aux cellules somatiques (*Spirogyra*) ou dans des cellules végétatives femelles peu modifiées nommées oogones (*Fucus*). Les spermatozoïdes sont produits dans des structures mâles spécialisées appelées anthéridies (Genèves, 1992).

I.5. Paramètres influençant la croissance des microalgues

Plusieurs espèces de micro-algues sont capables de passer d'une croissance photoautotrophe à une croissance hétérotrophe (sans lumière) utilisant le glucose ou d'autres substrats carbonés utilisables pour le métabolisme du carbone et de l'énergie. Certaines algues ont la croissance mixotrophie en combinant les deux modes. Les micro-algues présentent l'avantage d'avoir un cycle de division très court, de l'ordre de quelques heures, permettant la production rapide de biomasse. Leur développement fait intervenir plusieurs facteurs comme : l'eau, les nutriments, la lumière, le CO₂, la température et le pH (Person, 2010).

Dans le mode autotrophe, les micro-algues sont capables d'utiliser des formes minérales azotées (nitrate, nitrite, ammonium), et phosphatées (phosphate). Quel que soit le mode de croissance, les algues nécessitent également du potassium, du fer et de la silice, du soufre, des métaux sous forme de traces, et des vitamines. Pour le mode hétérotrophe, une source de carbone organique est utilisée (sucres, acides organiques, glycérol, etc.) (Person, 2010).

I.5.1. La température

Bien que d'amplitude beaucoup plus faible que dans l'atmosphère, les variations saisonnières de la température de l'eau de mer jouent un rôle important dans la répartition des algues : l'aire beaucoup d'entre elle étant limitée en latitude par la température moyenne des mois les plus froids ou les plus chauds, la flore algale des mers chaudes, tempérées et froides est très différente, elle dépend également des courants froids ou chauds et des remontées d'eaux froides de profondeur (Ozenda, 2000).

I.5.2 la lumière

Les algues sont des végétaux photosynthétiques, la lumière est de ce fait indispensable à leur vie (Gévaert, 2001). Cette énergie lumineuse est alors convertie en énergie chimique. Ainsi ce facteur intervient de différentes manières : par son intensité lumineuse, par la nature des radiations présentes et par la durée des périodes d'éclairement et d'obscurité (photopériodes). Les variations sont responsables du déclenchement subtil des phénomènes reproducteurs ou de l'apparition d'espèces saisonnières (Boumnick et al., 1990).

I.5.3. La composition et l'agitation de l'eau

La salinité d'eau de mer est en générale un peu supérieure à 30 g/l c'est le NaCl qui domine largement, les substances dissoutes dans l'eau de mer et surtout NaCl interviennent en raison de la pression osmotique élevée qu'elle détermine, obligeant les algues à maintenir dans leurs tissus une pression osmotique supérieure. Les sels nutritifs comme les nitrates et les phosphates sont indispensables aux algues et sont tous présents dans l'eau de mer et semblent être toujours en quantité suffisantes pour permettre leur développement. L'agitation de l'eau a pour résultat l'homogénéisation des couches de l'eau superficielles contribuant à limiter les variations de température et favorisant le renouvellement de l'eau en contact avec les algues (Ozenda, 2000).

I.6. Composition biochimique des microalgues

L'intérêt des micro-algues se manifeste par la diversité de leurs compositions biochimiques (tableau I). Cette biomasse se différencie principalement des autres végétaux par sa richesse en lipides, protéines, polysaccharides, pigments et antioxydants, mais le plus important est la

production de presque toutes les vitamines essentielles : la vitamine B12, la vitamine C (certaines algues vertes et brunes), la vitamine E (particulièrement les algues brunes) (Brown et al., 1997 ; Kaimoussi et al., 2004 ; Ortiz et al., 2006).

Tableau I : Compositions biochimiques des micro-algues (Becker, 2007).

Micro-algues	Protéines (%)	Polysaccharides (%)	Lipides (%)
<i>Chlorella vulgaris</i>	51-58	12-17	14-22
<i>Dunaliella salina</i>	57	32	6
<i>Porphyridium cruentum</i>	28-39	40-57	9-14
<i>Spirulina platensis</i>	46-63	8-14	4-9
<i>Synechococcus sp.</i>	63	15	11

I.7. Utilisation des microalgues

I.7.1. Utilisation thérapeutique

I.7.1.1. Activité antimicrobienne

Les microalgues marines ou d'eau douce ont été très largement étudiées pour la recherche de principes actifs antimicrobiens (antibiotiques, antifongiques, antiviraux, anti-algales). Des activités de type antibiotique ont été décrites chez toutes les classes de microalgues, ces activités étant présentes aussi bien dans des extraits aqueux qu'organiques (Muller-Feuga, 1997).

I.7.1.2. Action anticoagulante

Il a été ainsi constaté que les ulvanes (microalgues verts) retardent le temps de coagulation de manière dose dépendante pour les temps de thrombine et de céphaline activé. Cette prolongation indique bien un effet inhibiteur de ces polysaccharides sulfatés sur l'activité de la thrombine et de la polymérisation de la fibrine. L'inhibition de ces deux processus fait partie de la cascade réactionnelle à l'origine de la coagulation chez l'être humain (Synytsya, 2015).

I.7.1.3. Activité antidiabétique

Des dérivées de bromophénols du *Rhodomela confervoides* diminuent la glycémie chez le rat diabétique, *Sympholadialatiuscula* présente une activité inhibitrice de l'aldose réductase et pourrait être utilisée dans le traitement de complication du diabète comme les dommages oculaires et du système nerveux (Chouikhi, 2013).

I.7.1.4. Cytotoxicité et activité antiprolifératrice

Latubercidine, une molécule cytotoxique, a été identifiée chez la microalgue *Tolythrixbyssoides* ainsi que chez les cyanobactéries. Elle présente une action effective in vitro contre un type de leucémie lymphoïde. D'autres démarches ont été entreprises, entre autres par « l'Institut National du Cancer » avec un programme de dépistage visant des activités antivirales et anticancéreuses (Muller-Feuga, 1997).

I.7.2. Utilisation alimentaire

Les microalgues constituent un réel apport nutritif. Elles sont utilisées dans l'alimentation animale et humaine, grâce à ces éléments qui jouent un rôle nutritionnel qui sont les fibres, les éléments minéraux, les lipides, les amines, les antioxydants, l'agar, l'agarose, les alcaloïdes telle l'acide alginique et l'acide kainique, vitamines, polysaccharides sulfatés... (Ventura et Castanon, 1998 ; Chouikhi, 2013).

La biomasse peut être produite sous forme de poudre, tablettes, capsules, pastilles... Au niveau de l'alimentation humaine, deux espèces de microalgues, *Chlorella* et *Spirulina*, dominent le marché mondial (Filali, 2012) : Les phéophycées et les rhodophycées fournissent des farines et surtout des gelées, utilisées dans de nombreux produits, parmi les algues rouges les *Gelidium* et les *Chondres* sont les principales sources d'agar employé dans des entremets. Les cyanobactéries sont utilisées comme sources de protéines et des vitamines (Muller-Feuga, 1997). Le β -carotène est un pigment synthétisé par l'algue *Dunaliella* et est utilisé comme colorant en industrie alimentaire (Filali, 2012).

I.7.3. Utilisation comme engrais

La biomasse algale peut être valorisée comme engrais, fertilisant (apport de potassium, d'azote et d'éléments essentiels à la croissance végétale) et stabilisateur de sols dans le domaine de l'agriculture. Les microalgues permettent l'adhésion des particules et le stockage de l'eau dans les sols ainsi que la fixation de l'azote. De même, à partir de la synthèse de molécules bioactives, elles sont susceptibles d'influencer la croissance des plantes terrestres (Ozenda, 2000).

I.7.4. Elimination des métaux

Le traitement de métaux en solution se réalise couramment via des techniques physico-chimiques (précipitation/chélation, filtration membranaire...) et biologiques. Parmi ces dernières solutions, les microalgues se distinguent à la fois par une certaine tolérance à la présence de ces métaux et des rendements importants de fixation. A ce titre et étant donné leur position dans la chaîne trophique des milieux aquatiques (Doré-Deschênes, 2009).

I.7.4.1. Adsorption

L'adsorption peut se réaliser directement sur la paroi des cellules et/ou indirectement dans un mucus exo-polysaccharidique. Cette première étape, rapide et réversible, mobilise les charges portées par les groupes fonctionnels chargés négativement portés par la paroi (Filali, 2012).

I.7.4.2. Assimilation

Cette réaction est plus lente, mobilise un mécanisme actif et est irréversible. Les ions rejoignent leur destination et leur fonction métabolique ou expriment leur toxicité (Filali, 2012).

I.7.5. Utilisation pour la bio-fixation de CO₂

Le processus de fixation du CO₂ par les microalgues repose sur la mise en culture de ces microorganismes photosynthétiques dans différents systèmes de production, soit ouverts (bassins naturels ou artificiels...) ou fermés (bioréacteurs) (Doré-Deschênes, 2009).

I.7.6. Utilisation des microalgues comme bio indicateurs de la pollution

Par définition le bio indicateur est une espèce vivante qui, par sa présence, son absence ou sa rareté, permet d'évaluer la qualité de l'environnement. C'est le principe de « bioindicateurs quantitatifs » basé sur le fait que les organismes marins concentrent les contaminants, en particulier les métaux lourds, en relation avec les concentrations présentes dans le milieu (Bergasa, 2009).

D'un point de vue écotoxicologique, les microalgues sont bien connues pour réagir précocement à une grande variété de polluants. Les activités enzymatiques sont modifiées par certaines catégories de polluants et leur perturbation peut constituer un marqueur de leur présence. La fluorescence de la chlorophylle est un marqueur de perturbation du photosystème II lors de la photosynthèse. C'est donc un paramètre important à suivre ; en effet il est lié au stress cellulaire dû aux polluants modifiant l'activité photosynthétique (Naessens et al., 2000).

I.8. Les algues nuisibles

Le déversement dans la mer de déchets agricole (lisier, excès d'engrais) provoque une eutrophisation des eaux et notamment une augmentation des nitrates et des phosphates qui déterminent la prolifération d'algues, chlorophycées notamment et par conséquent un déséquilibre écologique (Ozenda, 2000). Ce type de microalgues est capable d'accumuler des composés toxiques particulièrement les métaux lourds qui ne va pas uniquement impacter les

algues, mais va progressivement toucher tout le reste de la chaîne jusqu'à l'homme lui-même comme consommateur de poissons et de crustacés herbivores (Anderson et *al.*, 2002).

Chapitre II :
Généralités sur les
métaux lourds

II.1. Définition

Les métaux lourds désignent des composés métalliques qui ont une masse volumique supérieure à 4.5 g/cm³ à l'exception du mercure qui est principalement sous forme de gaz. Ils ont un aspect brillant, une structure cristalline à température ambiante, à l'exception du mercure qui est liquide avec bonne voire excellente conductivité thermique et électrique (Galvez-Cloutier et al., 2005).

En toxicologie, ils peuvent être définis comme des métaux à caractère cumulatif (souvent dans les tissus graisseux) ayant essentiellement des effets très néfastes sur les organismes vivants (Adli, 2016). Les métaux lourds sont des polluants dont la nocivité est liée à leur rémanence et à leur spéciation. Les métaux lourds sont peu métabolisés (à l'inverse des polluants organiques), ils peuvent donc être transférés dans le réseau trophique et s'accumuler dans la matière vivante (Benguedda-Rahhal, 2011).

II.2. Caractéristiques physico-chimiques des métaux lourds

Les métaux lourds possèdent les propriétés physiques générales des métaux (bonne conductivité thermique et électrique). Ils sont fortement électropositifs et donnent par perte d'électrons des cations métalliques de charge variable. Ces cations métalliques, qui présentent à la fois des densités de charge élevées et un caractère électrophile, peuvent former avec des ligands des liaisons ioniques, covalentes ou intermédiaires. Le tableau II donne les caractéristiques physicochimiques des principaux métaux lourds (Belabed, 2010).

Tableau II : Caractéristiques physicochimiques des principaux métaux lourds.

Métaux lourds	Caractéristiques physicochimiques	Références
Cadmium	Elément chimique qui appartenant à la famille des métaux lourds. Il est un métal bleuté, mou et malléable, il présente une grande résistance à l'oxydation et une bonne ductibilité électrique.	(Bauda, 1986).
Plomb	Elément métallique de couleur gris bleuâtre, de numéro atomique 82, peu ou rarement disponible à l'état natif, il est présent dans de nombreux minerais, Il existe sous trois formes essentielles : le plomb dissous (PbCO ₃ , PbCl ₂ ou PbCl ⁺), le plomb colloïdal et le plomb particulaire avec deux états d'oxydation 2 ⁺ et 4 ⁺ .	(Belabed, 2010 ; Adli, 2016).

Mercure	Elément de transition du groupe IIB dans la classification périodique des éléments de Mendeleïev. Sous sa forme pure, le mercure se présente comme un métal brillant de couleur blanc gris.	(Maruszczak,2010).
Zinc	Elément métallique de symbole Zn ; il appartient au groupe (IIB) de la classification périodique des éléments. Le zinc est un métal ductile, bleu gris, moyennement réactif, qui se combine avec l'oxygène et d'autres non-métaux, et qui réagit avec des acides dilués en dégageant de l'hydrogène	(Chebira, 2008 ; Megatliet <i>al.</i> , 2009).
Cuivre	Elément chimique de numéro atomique $Z = 29$. C'est un métal rougeâtre, malléable et ductile, de conductivités thermique et électrique élevée .Il résiste à l'air et à l'eau mais se patine lentement en présence de carbonate. Il est présent dans la nature sous forme de minerais de cuivre natif, de minerais oxydés ou sulfurés.	(Serpaud et <i>al.</i> , 1994 ;Chebira, 2008).

II.3. Origine des métaux lourds

Une quantité importante de métaux lourds est introduite dans l'environnement par l'intermédiaire de sources naturelles et humaines (Gouin et *al.*,2016).

II.3.1. Sources naturelles

Parmi les importantes sources naturelles, citons l'activité volcanique, l'altération des continents et les incendies de forêts. 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 (Darmondrail et *al.*,2000).

II.3.2. Sources anthropiques

Les métaux provenant d'apports anthropiques sont présents sous des formes chimiques assez réactives et entraînent de ce fait, des risques très supérieurs aux métaux d'origine naturelle qui sont le plus souvent immobilisés sous des formes relativement inertes (Mckenzie, 1997).

La source anthropique englobe les activités pétrochimiques, l'utilisation de combustibles fossiles (centrales électriques au charbon, chaudières, fours à ciment), les activités industrielles, le transport (véhicules et moteurs routiers et non routiers, embarcations), l'incinération des déchets, les déchets urbains (eaux usées, boues d'épuration, ordures ménagères) et agricole et certains produits (interrupteurs électriques, amalgames dentaires, éclairages fluorescents) (Mckenzie, 1997 ; Gouin et *al.*, 2016).

II.4. Classification biologique des métaux lourds

Les métaux sont généralement séparés en deux catégories selon leur caractère essentiel ou non pour les êtres vivants. En effet, ils peuvent s'avérer indispensables au déroulement des processus biologiques (oligo-éléments), et d'autres ne sont pas nécessaires à la vie, et peuvent provoquer des dommages (El-Sheekh et *al.*, 2003 ; Picaud, 2017).

II.4.1. Les éléments traces essentiels

Un élément-trace dit « essentiel » s'il est nécessaire à la vie, sa carence entraînant soit la mort de l'individu, soit un dysfonctionnement grave de son organisme. En utilisant une définition plus large, on peut considérer comme « essentiel » tout élément minéral dont la carence a pour conséquence l'altération d'une ou plusieurs fonctions de l'organisme, ces dernières pouvant être corrigées par un apport adéquat (Nys, 2001 ; El-Sheekh et *al.*, 2003 ; Picaud, 2017).

Les éléments-trace sont « essentiels » s'ils répondent aux critères suivant :

Ils sont présents dans tous les tissus sains de tous les organismes vivants : c'est l'universalité, sont présents à une concentration relativement constante dans tous les tissus vivants : c'est les éléments de l'homéostasie, leur carence entraîne des anomalies structurales et fonctionnelles analogues dans de nombreuses espèces, l'apport du seul élément prévient ou guérit les troubles engendrés par la carence de ce dernier. Ex : le fer (Fe), le cuivre (Cu), le zinc (Zn) (Picaud, 2017).

II.4.2. Les éléments traces non essentiels

Certains métaux lourds ne participent à aucun processus vital ou physiologique et sont connus seulement pour leurs effets purement toxiques sur l'organisme Ex : le mercure (Hg), le plomb (Pb), le cadmium (Cd) et l'antimoine (Sb) (Aranguren, 2008).

Ces éléments qui ne présentent pas une fonction métabolique, sont connus comme « non essentiels » et généralement ont un seuil de concentration beaucoup plus bas pour devenir toxiques (Casas, 2005). Dans l'écosystème aquatique, les métaux lourds ne sont pas dégradés (Vivien, 2011).

Enfin, ils représentent un danger potentiel pour le consommateur de produits marins du fait de leur possibilité de concentration dans les espèces marines, de leur élimination difficile et de leur large répartition dans le milieu aquatique (Wang, 1987 ; Aranguren, 2008).

II.5. Utilisation des métaux lourds

En raison de leurs différentes caractéristiques spécifiques, les métaux lourds ont été largement utilisés dans les nouvelles technologies (tableau III) (métallurgique et électroniques). On peut ainsi les employer dans les aciers inoxydables, les matériaux du bâtiment, les munitions, les matériaux médicaux, la bijouterie, ... (Aranguren, 2008) et même les produits chimiques utilisés en agriculture, tel que les fongicides, les insecticides, les herbicides peuvent contenir plusieurs métaux toxiques comme Cu, Cd, Zn et Pb (Compaoré et Nanéma, 2010).

Tableau III : Principales utilisations des métaux lourds (Galvez-Cloutier et al., 2005).

Métaux lourds	Utilisations
Cd, Pb, Zn, Hg	Batteries et autres appareils électriques
Ti, Cd, Hg, En, Pb, Ce, Al, Cu, Cr.	Pigments et peintures
Pb, As, Cu, Sn, En, Mn	Biocides
Ni, Hg, Pb, Cd	Carburants
Cd, Sn,	Matières plastiques

II.6. Contamination des écosystèmes aquatiques par les métaux lourds

Parmi les substances chimiques susceptibles de constituer un danger pour la vie aquatique, figurent les métaux lourds dont certains sont violemment toxiques et qui sont de plus en plus utilisés dans divers secteurs de l'industrie moderne. Ces métaux sont d'autant plus dangereux qu'ils ne sont généralement pas éliminés vu l'absence des phénomènes de biodégradation. Ils finissent donc par se répartir entre les différents compartiments de l'écosystème aquatique

(eau, matières en suspension, algues, poissons, sédiments, ...) provoquant parfois la rupture de certains équilibres biologiques (Coulibaly et *al.*, 2009 ; Abdallaoui, 2014).

Les métaux présents dans l'eau peuvent exister sous forme des complexes des particules ou en solution. 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 aussi 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) (Gaujous, 1993).

II.7. Élimination des métaux lourds dans les écosystèmes aquatiques

L'adsorption pourrait être la première étape du processus d'élimination définitive des métaux lourds de l'eau. Au cours de leur distribution dans le milieu, le stockage permanent ou temporaire des métaux lourds se fait dans les sédiments aussi bien dans les environnements marins que dans les eaux douces. L'activité microbienne et les processus de réduction par oxydation peuvent modifier les propriétés des sédiments et influencer sur la composition de l'eau interstitielle. Les métaux lourds subissent de nombreuses transformations : réductions par processus biochimique interposé, méthylation, diméthylation et oxydation d'espèces des métaux isolés. Des réactions redox peuvent aussi faciliter certaines transformations. Les processus biochimiques sont effectués par des micro-organismes et par des algues, la méthylation du mercure par exemple, se produit quand des micro-organismes arrivent en contact avec des ions mercure alors qu'ils consomment des substances organiques. Le même cas est possible pour As, Sn, Pb (Calamari et Naeve, 1994).

II.8. La spéciation des métaux lourds

La spéciation d'un élément est sa répartition entre différentes espèces chimiques, caractérisées par leur propriétés chimiques et physiques (état d'oxydation, charge, nature des formes complexées, nature des interactions en jeu, solubilité, etc.) C'est une propriété essentielle qui détermine la mobilité des éléments, leur biodisponibilité leur réactivité chimique, et par là même leur toxicité. La compréhension des effets toxiques des métaux lourds en biologie suppose de contrôler leur spéciation dans deux « compartiments » : à l'extérieur et à l'intérieur de la cellule (Allen, 1996; Leonardo, 2014).

II.9. Biodisponibilité des métaux lourds

La concentration en métal total dans un environnement ne peut donc pas permettre de prédire l'impact toxicologique et la bioaccumulation de ce métal dans les organismes. La fraction bio disponible d'un micropolluant, représente l'ensemble des molécules présentes dans le milieu et susceptibles d'entrer en contact et/ou de contaminer les organismes (Benguedda-Rahhal, 2011).

La biodisponibilité des métaux lourds concerne la fraction labile, c'est-à-dire libre dans l'eau et les sédiments pouvant être ingérée par les organismes aquatiques et transportée vers les sites pour exercer leurs actions, la biodisponibilité d'un même contaminant est variable selon les caractéristiques du milieu (caractéristiques, physiques, chimiques, pH... etc.), les indicateurs biologiques (récepteurs écologiques), la nature du (des) contaminant(s) et l'âge de la contamination (Allen, 1996; Belabed, 2010).

II.10. Bioaccumulation des métaux lourds

La bioaccumulation est l'accumulation des substances toxiques dans les tissus des organismes vivants. C'est le cas par exemple des toxiques cumulatifs qui vont s'accumuler dans les tissus des organismes et dont les effets toxiques ne se produiront que lorsque leur dose d'effets sera atteinte. Tous les organismes vivants sont ainsi capables, à divers degrés, d'accumuler des substances toxiques, ce qui peut, dans un certain nombre de cas, entraîner des phénomènes de transfert d'amplification dans la chaîne alimentaire, avec des teneurs observées d'autant plus fortes que l'organisme est élevé dans la chaîne alimentaire. Le facteur de bioconcentration (BCF) et le facteur de bioaccumulation (BAF) sont deux paramètres utilisés pour la mesure des concentrations d'un polluant dans l'organisme (Boudin, 2005).

La présence des métaux lourds dans les milieux aquatiques induit des effets dévastateurs sur la balance écologique de l'environnement aquatique. Les milieux aquatiques sont très sensibles aux éléments traces métalliques par la coexistence des phénomènes de bioaccumulation. En effet, ces éléments traces se concentrent dans l'eau et les microorganismes aquatiques entraînant ainsi leur bioaccumulation dans les ressources aquatiques (figure 6). Ces organismes vivants peuvent accumuler les polluants à des concentrations supérieures à celles de leur biotope (Ouro-Sama et al., 2014)

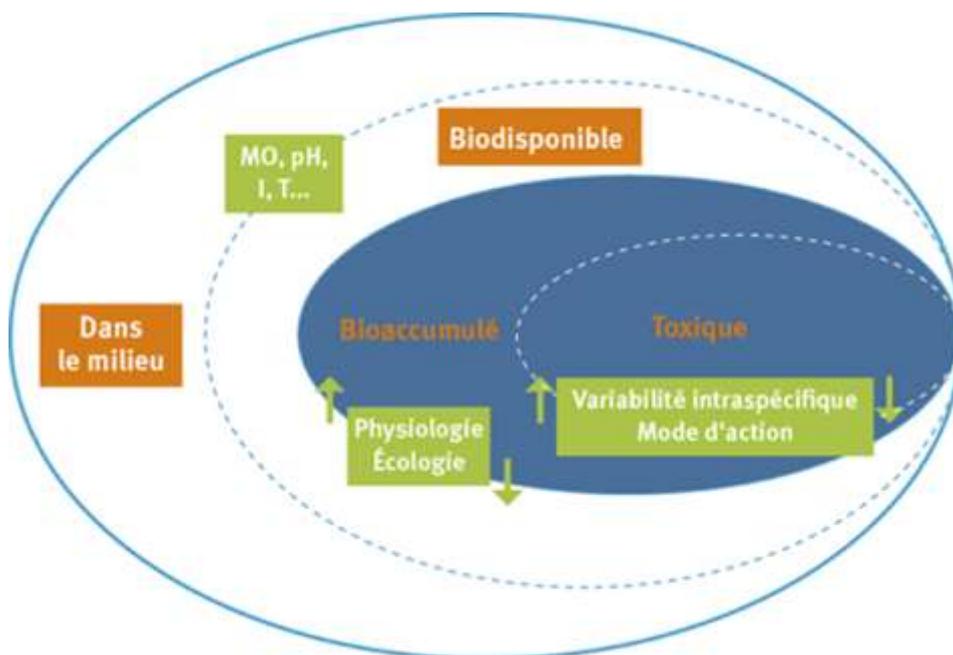


Figure 6 : Biodisponibilité et bioaccumulation des contaminants dissous dans le milieu aquatique (<http://www.set-revue.fr/que-sait-de-la-biodisponibilite-des-contaminants-dissous-dans-le-milieu-aquatique>)

II.11. Bioamplification des métaux lourds

Ce mécanisme physiologique correspond au processus selon lequel la contamination d'un composé chimique dans un organisme est supérieure à celle de la paroi qu'il consomme c'est donc la possibilité pour un toxique d'être cumulé par une chaîne trophique. Si le toxique n'est pas dégradé ou éliminé, il va s'accumuler de plus en plus au niveau de chaque maillon de la chaîne alimentaire (Boursafi,2014).

Le polluant, présent dans les microalgues et les autres microorganismes (premier niveau trophique) est ingéré par un herbivore, lui-même proie pour un carnivore, lui-même proie d'un super carnivore, animal ou homme. Ce processus classique appelé « transferts trophiques » permet le passage du polluant depuis le premier niveau jusqu'au bout de la chaîne (figure 7), consommateur final, on se trouve donc avec un consommateur final ayant bio accumulé les formes solubles des métaux. Cette amplification a été constatée pour plusieurs contaminants organiques, et dans le cas des métaux, pour la forme méthyle du mercure (Adli,2016).

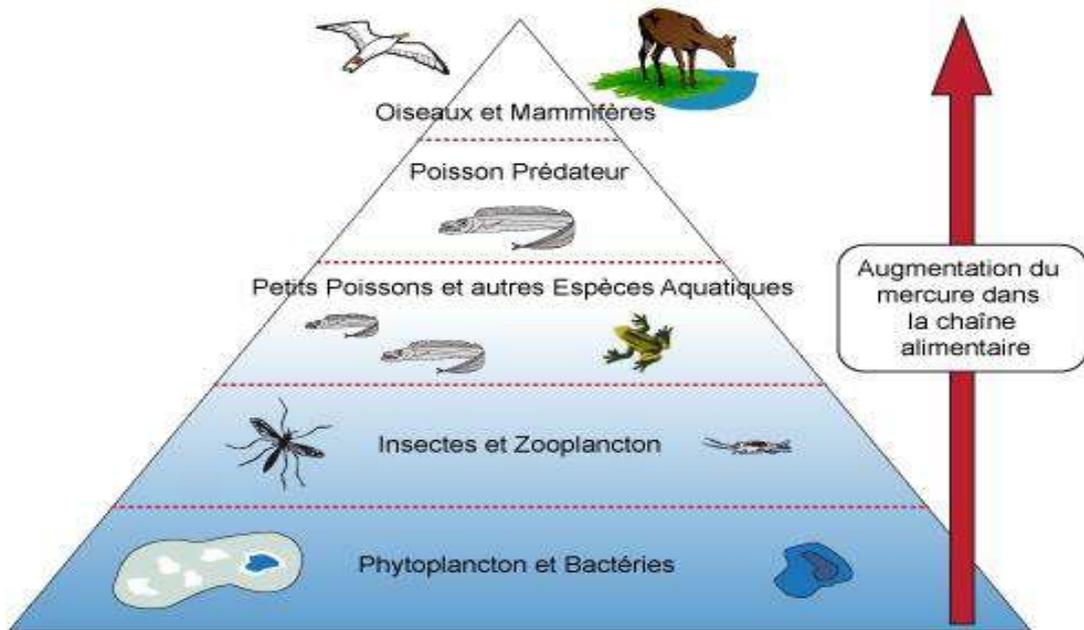


Figure 7 : Bioamplification du mercure dans le réseau trophique(Adli,2016)

Chapitre III :
Toxicité des métaux
lourds

Les métaux lourds sont persistants dans l'environnement et viennent au premier rang des substances dangereuses. C'est ainsi que dans les écosystèmes aquatiques, la contamination par des métaux lourds peut avoir des effets dévastateurs non seulement sur l'équilibre écologique de l'environnement récipiendaire, mais aussi sur une diversité d'organismes aquatiques (Guedenon et *al.*,2011).

Le plomb, le cuivre, le cadmium, le zinc et le nickel sont parmi les polluants communs les plus trouvés dans les effluents industriels et urbains. Certains métaux lourds comme Cu, Zn, Ni et Mn sont considérés comme des oligo-éléments essentiels pour les organismes photosynthétiques ; cependant, à des concentrations plus élevées, ces métaux provoquent de graves effets toxiques. Les métaux lourds affectent tous les organismes vivants, en particulier ceux de l'écosystème aquatique (Dos Santos et *al.*,2013).

III.1. Importance de la concentration dans la toxicité métallique

En toxicologie, le lien entre la concentration des métaux lourds et leur toxicité semble régi par une relation dose-réponse classique. Pour les métaux essentiels, la courbe dose réponse (figure 8) se décompose en trois phases : les cellules sont carencées lorsque la concentration de métal est trop faible ; les métaux sont tolérés, régulés et utiles au développement de la cellule dans une gamme de concentration intermédiaire qualifiée d'optimale, enfin ils deviennent toxiques pour la cellule à fortes concentrations. La première phase de la courbe (carence) n'est pas observée pour les métaux non-essentiels : ils sont régulés ou tolérés à faibles concentrations et ont des effets toxiques à plus fortes concentrations. Dans les deux cas, la toxicité apparaît au-delà d'une concentration seuil (Leonardo,2014).

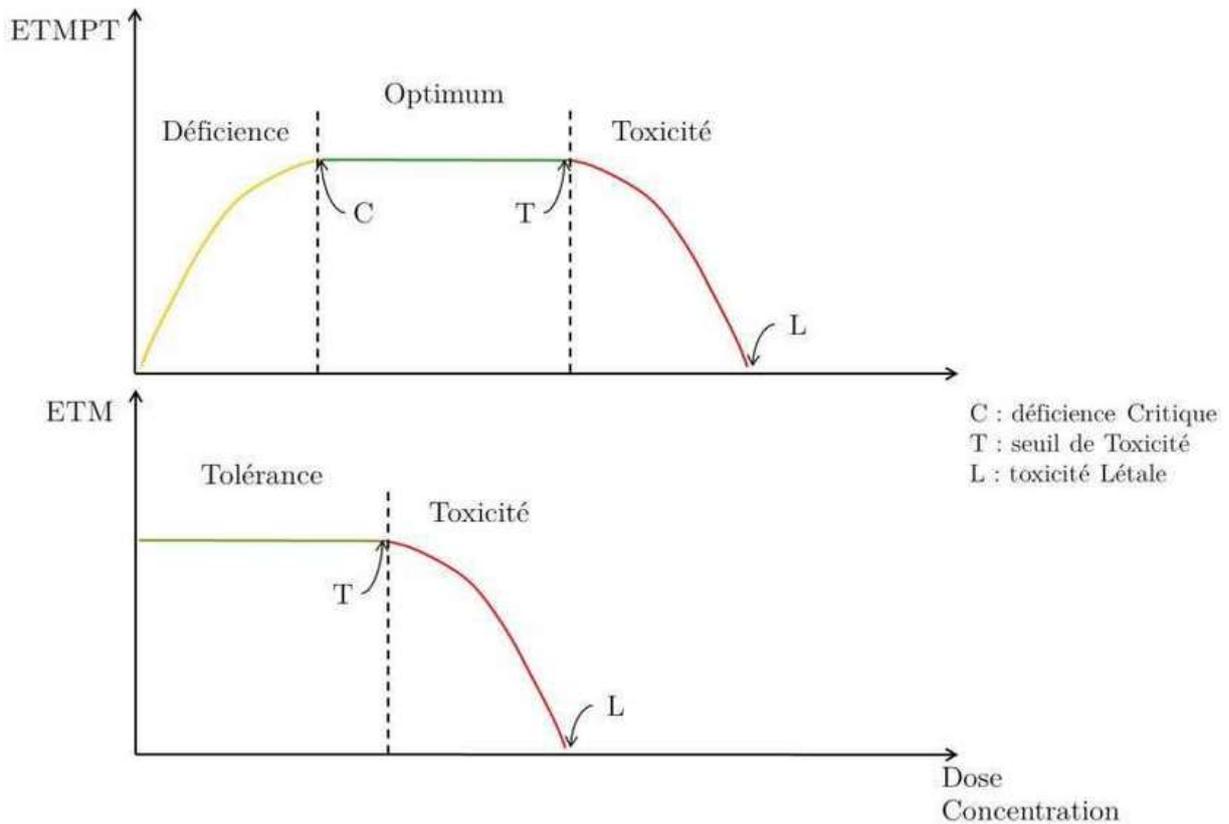


Figure 8 : Courbe dose-réponse générale pour les éléments traces métalliques essentiels, et les éléments traces métalliques non essentiels (Priaç,2014). ETMPT : éléments traces métalliques potentiellement toxiques, ETM : éléments traces métalliques.

III.2.Effets toxiques des métaux lourds sur l'Homme

Les métaux lourds s'accumulent facilement dans l'organisme et particulièrement au niveau des reins. Chaque espèce a des effets spécifiques sur la santé humaine. Les symptômes de la toxicité apparaissent en cas d'absorption ou de contact avec de fortes concentrations en métaux ou de concentrations plus faibles sur une longue période(Squinazi,2020), le tableau VI présente l'effet de principaux métaux lourds sur la santé humaine.

Tableau VI : effet de principaux métaux lourds sur la santé humaine

Polluant	Effet sur la santé	Référence
Plomb (Pb)	Saturnisme, perturbation du système nerveux et des reins, anémie, troubles de la fonction spermatique.	(Squinazi,2020)
Arsenic (As)	Atteintes cardiovasculaires, problèmes respiratoires et hépatiques, classé cancérogène de groupe 1 par le CIRC.	(Lenoble,2003)
Cadmium (Cd)	Troubles sanguins, rénaux, osseux et nerveux. Certaines de ses formes sont classées cancérogènes de groupe 1 par le CIRC.	(Andujar,2011)
Mercure (Hg)	Allergies, atteintes pulmonaires,atteintes neurologiques (encéphalopathie) ou rénales (tubulopathie, glomérulonéphrite) pertes de mémoire.	(Andujar, 2011)
Cuivre (Cu)	Anémie, de neutropénie ou de myélopathie, encéphalopathies comme la maladie d'Alzheimer et la maladie de Parkinson.	(Zeerleder et al.,2010)

III.3. Effets toxiques des métaux lourds sur l'écosystème aquatique

Les métaux lourds peuvent contaminer les eaux de surface et souterraines, et perturbant l'équilibre des écosystèmes aquatiques. Ces métaux deviennent toxiques à des concentrations élevées en raison de leur capacité à s'accumuler dans les organismes vivants (Belabed,2010).

Une des principales conséquences de la présence des métaux dans l'eau de mer est leur passage dans la biomasse. Ce transfert peut enchaîner des toxicités directes qui se manifestent rapidement par une atteinte de la biomasse, ou indirectes qui sont liées à l'accumulation progressive de ces métaux par les organismes (Ramade, 1998).

La faune des milieux aquatiques est exposée à un phénomène de bioaccumulation métallique, il semblerait que les fruits de mer, mollusques et crustacés, et dans une moindre mesure, certains poissons sont des excellents capteurs de polluants, ces organismes accumulent surtout le cadmium et dans une moindre mesure le plomb, mais peu le mercure. Les intoxications les plus importantes chez l'homme et les plus graves, notamment pour le mercure, ont souvent été liées à la consommation de poissons (Belabed, 2010).

Les effets observés aux niveaux trophiques supérieurs se manifestent notamment par un retard du développement des embryons, des malformations et une moins bonne croissance des adultes chez les poissons, les mollusques et les crustacés (Chouti *et al.*, 2010).

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

III.4.1. Bioaccumulation des métaux lourds dans les microalgues

Les microalgues exposées continuellement en milieu marin aux polluants métalliques tels que l'Ag, le Cd et le Cu ont présenté souvent une grande capacité d'accumulation des métaux lourds. Les microalgues ont développé différents mécanismes de tolérance, en effet, les métaux lourds peuvent s'adsorber à la surface algale ou à la matière organique excrétée par les microalgues, ou encore être liés au niveau du cytosol, à des composés protéiniques tels que les phytochélatines ou dans des organites intracellulaires. La détoxification permet d'éviter ou du moins de réduire la toxicité de ces éléments sur la croissance et les processus physiologiques tels que la photosynthèse, la respiration, l'absorption d'éléments nutritifs (Perrein-Ettajani *et al.*, 1999).

III.4.2. Formes des métaux lourds dans les microalgues

La toxicité d'un métal dépend de la concentration des différentes espèces chimiques du métal (la spéciation chimique du métal). Dans le milieu aquatique, la spéciation chimique du métal régit la disponibilité du métal. Par exemple, les métaux présents sous forme d'ions libres pénètrent plus facilement dans la cellule qu'un métal fortement complexé ou précipité. Dans l'organisme, la spéciation chimique intracellulaire gouverne la circulation et la séquestration du métal contaminant. Des mécanismes d'homéostasie sont mis en œuvre afin de maintenir les concentrations adéquates en ions métalliques essentiels (Fe, Cu, Zn, Mn, ...) dans certains compartiments cellulaires. De plus, la cellule met en place des mécanismes de tolérance visant à minimiser les dommages engendrés par la compétition entre ions métalliques essentiels et non-essentiels pour les sites biologiques d'intérêt majeur. Cette répartition subcellulaire et cette spéciation auront également des répercussions sur la façon dont sera remobilisé le métal par la suite (Penen, 2015).

III.4.3. Mécanismes de toxicité des métaux lourds chez les microalgues

Les mécanismes de toxicité des métaux lourds peuvent être répartis en deux catégories : interaction directe entre les ions métalliques, les protéines, l'ADN ou d'autres molécules dont le comportement sera modifié, ou elle peut être le fruit du stress oxydant causé par les métaux (Leonardo, 2014).

III.4.3.1. Interaction avec les protéines et l'ADN

Des interactions entre les cations Cd^{2+} , Hg^{2+} et Pb^{2+} et les protéines sont rapportées dans la littérature. Les protéines peuvent être affectées de deux façons : les cations peuvent modifier la structure tridimensionnelle des protéines, par exemple en se liant aux groupements thiols des acides aminés qui la composent, ou ils peuvent se substituer aux cofacteurs métalliques des métalloprotéines. Dans les deux cas, les protéines sont dénaturées et leur fonction n'est plus assurée (Leonardo, 2014).

Les ions métalliques peuvent également interagir avec l'ADN, c'est notamment le cas du nickel, du chrome et du platine (Sharma et al, 2008).

III.4.3.2. Accumulation des dérivés réactifs de l'oxygène et stress oxydant

Les métaux lourds peuvent engendrer l'accumulation de dérivés réactifs de l'oxygène (ROS, pour reactiveoxygenspecies), provoquant un état de stress oxydant qui semble être l'une des principales causes de la toxicité des métaux (Leonardo, 2014).

Les ROS sont produites par tous les organismes aérobies, c'est-à-dire les organismes dont les voies métaboliques utilisent le dioxygène comme accepteur final d'électrons au cours de la respiration. Ils interviennent dans différents processus cellulaires, par exemple des processus de signalisation ou de défense. En conditions de fonctionnement normales, leur production et leur suppression sont régulées par des mécanismes antioxydants afin de maintenir la balance de potentiel oxydo-réducteur à l'équilibre (Sies, 1997).

La cellule est en état de stress oxydant lorsque cet équilibre est rompu et que le système antioxydant de la cellule est submergé par une quantité trop importante de ROS (Sies, 1997).

III.4.4. Effets toxiques des métaux lourds sur la croissance des microalgues

Les métaux lourds (Cd, Cu, Pb, As, Zn, Ag) altèrent essentiellement la croissance des microalgues (tableau V). Le cadmium considéré comme non-essentiel, selon plusieurs études inhibe la croissance de nombreuses algues vertes (Ben Ali et al., 2017).

TableauV : Effet de principaux métaux lourds sur la croissance des microalgues

Métaux lourds	Microalgues	Concentration	Effet sur la croissance	Références
Cd	<i>Chlorella vulgaris</i>	$\leq 100 \mu\text{M}$	50% inhibition de la croissance	(Ben Ali et al.,2017).
	<i>Desmodesmu sp.</i> et <i>Cladophorafracta d</i>	$\leq 200 \mu\text{M}$	réduisait la croissance des algues de 85 et 50%	
Cu	<i>Phaeodactylumtricornutum</i>	$0,10 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$	une réduction de croissance d'environ 50%	(Cid et al., 1997 ; Knauer et al.,1997)
Ag	<i>Tetraselmis. suecica</i>		La croissance des algues diminue(55%).	(Perrien-Ettajani et al.,1999)
Pb	<i>Alexandriumcatenella</i>	25 μM	La croissance est fortement inhibée réduction prononcée de l'abondance cellulaire (82%).	(Herzi,2013)
		60 μM , 100 μM et 200 μM	La croissance s'arrêtait totalement, toutes les cellules étant alors transformées en Kystes	

Zn	<i>Phaeodactylumtricornutum</i>	0,05 µM à 10 µM.	Inhibition de 10 % à 30 % de la croissance.	(Nguyen-Deroche,2008).
As	<i>Skkeletonema costatum</i>	Doses supérieures à 5 µg/l. As ³ et	Inhibent le développement.	(Michel,1993)
		As ⁵ Avec 0,2 pg/cellule	La croissance de nombreuses diatomées est réduite, voire nulle.	

III.4.5. Effetstoxiques sur la photosynthèse

Les microalgues sont des organismes photosynthétiques, généralement les métaux lourds sont capables de perturber cette fonction de photosynthèse (Ben Ali et al., 2017).

III.4.5.1. Le cas ducadmium

Le cadmium inhibe généralement la photosynthèse chez la majorité des microalgues comme *Chlorellasorokiniana*, *Scenedesmusarmatus*, *Chlorellapyrenoidosa* et *Microcystisaeruginosa* exposées à des concentrations inférieures à 250 µ M, à des concentration ≤10 µM le Cd provoque une réduction significative de la photo activation du photosystème II chez *Planothidium lanceolatum* et *Pseudokirchneriella subcapitata* (Ben Ali et al., 2017).

III.4.5.2. Le cas du cuivre

A forte concentration, le cuivre peut affecter et inhiber la photosynthèse (Nguyen-Deroche, 2008), cette inhibition dépend des espèces exposées, une concentration de 0,1 mg . l⁻¹ produit une légère inhibition de la photosynthèse chez *Chlorellapyrenoidosa*, tandis que la concentration de 0,25 mg . l⁻¹ produit une inhibition totale. Par conséquent, la croissance est plus affectée par le cuivre que la photosynthèse (Cid et al., 1995).

La photosynthèse et la respiration de *Chlorellasorokiniana* Shihira et Krauss étaient inhibées par l'ion cuivrique, mais la photosynthèse était plus sensible que la respiration. La photosynthèse et la respiration ont été inhibées en 2 et 5 minutes, respectivement, après l'ajout d'ions cuivriques 1,0 mM. Les cellules de *chlorelle* qui avaient été incubées pendant une

courte période à des concentrations de l'ion cuivrique qui inhibaient complètement la photosynthèse, indiquant des concentrations élevées de l'ion peuvent avoir détruit l'appareil photosynthétique. Le transport d'électrons dans les photosystèmes I et II dans des cellules *Chlorella* intactes a été inhibé (Cedeno-Maldonado, 1974).

III.4.5.3. Le cas du zinc

Le zinc est aussi capable d'affecter la photosynthèse. L'activité photosynthétique est plus réduite que la croissance en présence de Zn, chez *Skeletonemacostatum*, *Eurybiapaludosa* et *Nitzschiapalea*, une concentration de 20 μM , provoque une diminution de la capacité photosynthétique, le même effet est observé chez la microalgue verte *Chlamydomonas reinhardtii* en présence d'une concentration de 2 mg L^{-1} (soit 30,8 μM) et chez une autre algue verte *Pseudokirchneriella subcapitata* en présence d'une concentration de 910 $\mu\text{g L}^{-1}$ (soit 14 μM) (Nguyen-Deroche, 2008 ; Nguyen-Deroche et al., 2012).

III.4.5.4. Le cas d'argent

Les effets biologiques de l'exposition de *Chlamydomonas reinhardtii* à Ag^+ sont nombreux :

- L'appareil photosynthétique des algues est affecté, leur rendement de photosynthèse diminue (Pillai et al., 2014).
- La quantité d'ATP dans la cellule diminue, probablement du fait de l'inhibition de protéines clés dans le chloroplaste et la mitochondrie, principaux lieux de production de l'ATP dans la cellule. L'utilisation d'ATP pour excréter les ions Ag^+ pourrait également participer à cette diminution (Pillai et al., 2014).
- La perturbation des chaînes de transfert d'électrons des chloroplastes et des mitochondries entraîne également la formation de ROS et l'apparition d'un stress oxydant. (Pillai et al., 2014).

III.4.5.5. Le cas du cobalt

Le cobalt pourrait être un élément essentiel pour les micro-algues de par son implication dans d'autres métalloprotéines que la vitamine B12 et ses dérivés (Kobayashi et Shimizu, 1999).

Le cobalt, à forte concentration, engendre des effets toxiques chez tous les organismes vivants (Palit et al., 1994 ; Bresson et al., 2006). Chez les microalgues il provoque une perturbation du photosystème et diminution de la quantité de pigments (chlorophylle a, chlorophylle b et carotènes) (El-Sheekh et al., 2003).

La diminution de la quantité de chlorophylles observée chez les micro-algues, les diatomées et les plantes supérieures exposées à des concentrations toxiques de cobalt pourrait être due au remplacement de l'ion Mn^{2+} par un ion Co^{2+} dans la protoporphyrine, précurseur des chlorophylles, qui inhiberait la synthèse de ces pigments (El-Sheekh et al., 2003)

III.4.6. Effet du stress oxydatif provoqué par les métaux lourds sur les microalgues

Les métaux lourds peuvent engendrer l'accumulation de dérivés réactifs de l'oxygène chez les microalgues. Cet effet varie en fonction de l'espèce microalgale, A faibles concentrations (50 et 100 μM), le Cd est incapable d'induire la peroxydation lipidique chez *Picocystis*, alors que chez d'autres espèces comme *Chlorella vulgaris*, *Hizikia fusiformis* et *Spirulina platensis*, les mêmes concentrations faibles provoquent une peroxydation lipidique totale (Ben Ali et al., 2017).

Chez *Chlamydomonas reinhardtii*, il a été montré que le cadmium provoquait une augmentation du stress oxydatif, une inhibition de la photo activation du photosystème II et une augmentation de la production d'amidon (Penen, 2015).

Le stress métallique induisait la transformation des cellules végétatives d'*Alexandrium catenella* en kystes (Figure 9). Les concentrations métalliques minimales qui ont entraîné l'enkystement étaient de : 12 μM pour le cadmium, 16 μM pour le cuivre, 25 μM pour le plomb et 60 μM pour le zinc. Les kystes formés en réponse à la contamination cuivrique possédaient une forme spécifique, particulièrement allongée (Figure 9.B), tandis que les autres métaux lourds provoquent des kystes de forme circulaire (Figure 9.C) (Herzi, 2013).



Figure 9. *Alexandrium catenella* observée au microscope (G : $\times 400$) (A) Cellules végétatives cultivées en conditions témoins (B) Cellule transformée en kyste sous l'effet du Cuivre (C) Cellule enkystée en réponse aux autres contaminations métalliques (Herzi, 2013).

III.4.7. Déséquilibre de la balance ionique des microalgues par les métaux lourds

Le maintien d'une balance ionique équilibrée est la condition nécessaire au bon fonctionnement de la cellule algale. Divers métaux lourds ou composés chimiques sont capables de modifier cet équilibre chez l'algue *Dunaliellatertiolecta* comme (zinc, cadmium, mercure, méthyl-mercure, plomb, cuivre) (Overnell,1975).

III.4.8. Toxicité des métaux lourds au niveau ultra structural

III.4.8.1. Le cas de cadmium

Des effets sur les structures intracellulaires des algues peuvent également être observés lors d'expositions prolongées à des solutions contenant des métaux lourds. Des essais sur *Chlamydomonasacidophila* ont montré qu'après un traitement avec du cadmium, les cellules algales présentaient des dommages structurels. Le cadmium cause ainsi les changements les plus importants : augmentation des granules d'amidon, des vacuoles et des chloroplastes (Ben Amor,2015). Au niveau ultra structural, une augmentation de l'espace périplasmique a été observée en raison de la présence d'un grand nombre de vacuoles, ainsi qu'une diminution du volume relatif du noyau lorsque les cellules ont été incubées en présence de Cd (Aguilera et, Amils,2005).

III.4.8.2. Le cas de sélénium

Le sélénium est un élément essentiel, mais qui devient très toxique à des concentrations plus élevées. L'interaction entre le sélénium et un organisme phytoplanctonique d'eau douce : l'algue verte unicellulaire *Chlamydomonas reinhardtii* (figure 10.a) donne les résultats suivants :

Le chloroplaste soit la première cible de la cytotoxicité de l'élément, avec des effets sur le stroma, les thylakoïdes et le pyrénôïde. Aux concentrations les plus élevées, il y a une augmentation du nombre et du volume des grains d'amidon, ainsi que la formation de granules denses aux électrons (figure10.b) (Morlon, 2005).

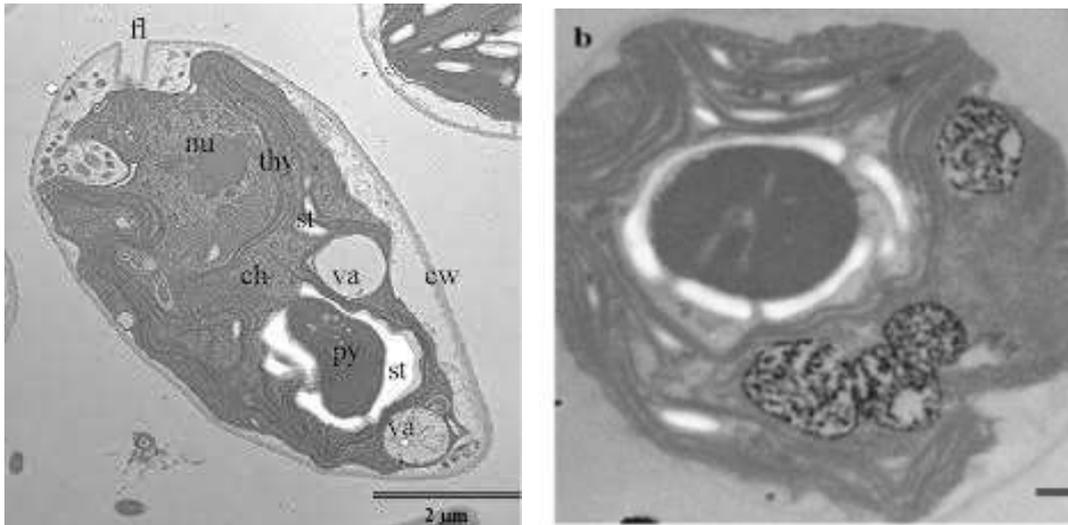


Figure 10 : a. algue contrôle : Cellule typique de *Chlamydomonas reinhardtii* obtenue par microscopie électronique à transmission. fl : flagelles ; cw : paroi cellulaire ; ch : chloroplaste ; nu : noyau ; thy : thylakoides ; py : pyrénolide ; st : amidon ; va : vacuoles. b. algue exposée au sélénium ayant formé des granules (Morlon, 2005).

III.4.8.3. Le cas de zinc

Le zinc peut provoquer des modifications ultrastructurales pour les cellules de *Skeletonemacostatum* avec l'apparition de tubules issus de l'appareil de Golgi et de nombreuses cassures des membranes des chloroplastes et des mitochondries, pour augmenter la surface membranaire capable de fixer le zinc en excès (Smith, 1983).

III.5. La tolérance des microalgues aux métaux lourds

Afin de prévenir la toxicité des métaux lourds, les cellules végétales (microalgues) doivent donc réguler leur spéciation et leur concentration intracellulaire. Elles doivent notamment réguler la concentration cytosolique des ions métalliques libres. La tolérance est généralement spécifique à un métal particulier : par exemple une micro-algue tolérante au cuivre ne sera pas nécessairement tolérante au cadmium (Clemens, 2001 ; Gaur et Rai, 2001).

Les capacités d'exclusion ou d'hyper accumulation de métaux lourds indiquent l'existence de mécanismes permettant de réguler l'incorporation des métaux lourds et de neutraliser leur toxicité. Ces mécanismes peuvent être regroupés en trois catégories (Gaur et Rai, 2001 ; Gadd, 2010).

III.5.1. Les Mécanismes limitant l'entrée des métaux dans la cellule

Les cellules des microalgues limitent la concentration intracellulaire des métaux lourds en réduisant leur assimilation par trois types de mécanismes (Mcknight et Morel, 1979).

III.5.1.1. Complexation des ions métalliques à la surface de la cellule

De nombreuses microalgues et cyanobactéries sécrètent des quantités importantes de mucilage, substance visqueuse enrobant les cellules, la fixation d'ions cadmium Cd^{2+} sur le mucilage de la cyanobactérie *Gloeotheca*. Une plus forte sensibilité à la toxicité métallique (cadmium, cobalt, cuivre, nickel) a été rapportée pour des mutants de *Chlamydomonas reinhardtii* dépourvus de paroi cellulaire (Macfie et al., 1994).

III.5.1.2 Exclusion des métaux lourds par modification de la structure de la paroi cellulaire ou de la membrane plasmique

La structure de la paroi cellulaire, et en particulier son épaisseur, semble influencer sur la tolérance des algues aux métaux : les algues aux parois cellulaires plus épaisses sont moins sensibles à la toxicité métallique, certaines conditions de stress peuvent engendrer une modification de la paroi, son épaissement a par exemple été observé chez la micro-algue verte *Scenedesmus obtusiusculus* en réponse à une carence en phosphate mais de telles observations n'ont pas été rapportées dans le cas d'un stress métallique (Krzesłowska, 2010).

III.5.1.3. Complexation extracellulaire par sécrétion des ligands

Les micro-algues vertes (*Chlamydomonas*, *Chlorella*) sécrètent, lorsqu'elles sont exposées à l'ion Cu^{2+} , des ligands qui complexent le cuivre en solution et qui sont probablement des acides organiques. Ces ligands participent à la protection des algues contre la toxicité métallique (Gaur et Rai, 2001).

III.5.2. Mécanismes d'excrétion des métaux lourds

Les micro-algues de l'espèce des *chlorelles* mettent en œuvre un mécanisme d'excrétion de l'ion mercurique Hg^{2+} particulier : il est d'abord réduit par voie enzymatique en mercure métallique Hg^0 , puis excrété par la cellule par volatilisation.

L'excrétion d'argent par la micro-algue verte *Chlamydomonas reinhardtii* est observé lors d'expositions à Ag^+ (Pillai et al., 2014).

Un mécanisme actif d'efflux de l'ion Al^{3+} chez la micro-algue rouge *Cyanidium caldarium* pour expliquer sa tolérance à l'aluminium (Yoshimura et al., 1999).

III.5.3. Mécanismes de gestion des métaux incorporés : chélation et compartimentation subcellulaire

La détoxification des métaux incorporés par les cellules repose sur la modification de leur spéciation par chélation intracellulaire ou oxydo-réduction et sur leur compartimentation subcellulaire dans différents organites. Les phytochélatines sont d'origine biosynthétiques. Elles sont synthétisées à partir de glutathion (GSH) par les enzymes phytochélatines synthèse. Leur synthèse est induite in vivo par la présence de nombreux ions métalliques (Cd^{2+} , Ag^+ , Pb^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} ...) en particulier chez les micro-algues (Gaur et Rai, 2001).

Conclusion

Les microalgues sont des organismes photosynthétiques présentant de diverses caractéristiques biochimiques intéressantes pour un grand spectre d'applications dans différents domaines à savoir : l'alimentation humaine et animale, et la production de molécules à hautes valeurs ajoutées pour des fins industrielles, notamment les domaines pharmaceutiques et cosmétiques, et aussi sont utilisées dans le traitement des eaux usées par la bioaccumulation des métaux lourds.

Les métaux lourds sont des métaux à caractère cumulatif ayant essentiellement des effets très néfastes sur les organismes vivants. Certains métaux lourds (Zn, Cu) sont essentiels à certains seuils de concentration, en revanche d'autres sont des toxiques pour l'environnement et la santé même à faibles concentrations, il s'agit de Cd, Pb et Cd. Ces éléments sont considérés comme les plus préoccupants pour l'environnement et les plus toxiques pour les écosystèmes aquatiques.

Plusieurs études soulignent l'effet toxique des métaux lourds sur les microalgues, ils altèrent plusieurs processus physiologiques à savoir la croissance, la photosynthèse, la déséquilibration de la balance ionique et des effets sur les structures intra cellulaires.

Notre recherche bibliographique basée sur les effets toxiques des métaux lourds sur les microalgues nous a permis de déduire pas mal des informations que ce soit sur la connaissance des métaux lourds les plus toxiques même à faibles concentrations, que ce soit les mécanismes de toxicité de ces polluants sur la population des microalgues. Notre étude nous a permis aussi de savoir que la toxicité des métaux lourds sur les microalgues est exercée beaucoup plus sur la croissance.

Donc des études pratiques doivent être effectuées pour sélectionner les concentrations les plus toxiques des métaux lourds, de même pour sélectionner les espèces des microalgues les plus résistantes, et les plus accumulatrices aux métaux lourds et donc les exploiter dans les domaines de bio remédiation particulièrement le traitement des eaux usées.

*Références
bibliographiques*

-A-

Abdellaoui A. (2014). Les métaux lourds dans l'environnement, *Ed. Édilivre*. France, pp : 5-7.

Adli C. (2016). Quantification des éléments traces métalliques (cadmium, plomb et mercure total) de certains produits de la pêche débarqués dans la zone Essaouira-Dakhla : Evaluation des risques sanitaires. Th. Doc: Univ. Ibn Zohr. Maroc. 91p.

Aguilera A., Amils R. (2005). Tolerance to cadmium in *Chlamydomonas sp.* (Chlorophyta) strains isolated from an extreme acidic environment, the Tinto River (SW, Spain). *Aquatic toxicology*, 75(4): 316-329.

Allen H. E., Hansen D. J. (1996). The importance of trace metal speciation to water quality criteria, *Water Environment Research*, 68(1): 42-54.

Amirouche N., Bouguedoura N., Haj-Arab H., (2009). Botanique : Algues, Champignons, Lichens, *Ed. Houma*, Alger. pp: 5-15.

Andujar P., Bensefa-Colas L., Descatha A. (2011). Intoxication par le mercure, *La Revue de médecine interne*, 32(7) :416-424 p.

Anderson D., Glibert P., Burkholder J. (2002). Harmful algal blooms and eutrophication: nutrient sources composition and consequences, *Estuaries*, 25(4):704-26.

Antia N. J., Cheng J.Y. (1982). The Keto-caroténoid of two marine coccoidemembre of the *Eustigmatophyceae*, *British Phycological journal*, 17:39-50.

Aoun M. (2008). Action du cadmium sur les plants de moutarde indienne [*Brassicajuncea (L.) Czern*] néoformés à partir de couches cellulaires minces et issus de semis, Analyses physiologiques et rôle des polyamines. Th. Doc : Univ. Bretagne occidentale - Brest. France .163p.

Aranguren M. M. S. (2008). Contamination en métaux lourds des eaux de surface et des sédiments du Val de Milluni (Andes Boliviennes) par des déchets miniers Approches géochimique, minéralogique et hydrochimique. Th. Doc : Univ. Toulouse III - Paul Sabatier. France. 490 p.

-B-

- Bauda P. (1986).** Accumulation et toxicité du cadmium chez les bactéries Gram négatif : rôle des enveloppes bactériennes. Th. Doc: Univ. Paul Verlaine – Metz. France.181p.
- Becker E W. (2007).** Micro-algae as a source of protein,*Biotechnology Advances*,25: 207–210.
- BelabedB. (2010).** La pollution par les métaux lourds dans la région d’Annaba « Sources de contamination des écosystèmes aquatiques ». Th. Doc : Univ Badji Mokhtar Annaba. Algérie. 199p.
- Ben Ali R., Ben Ouada S., Chouchene L., Messaoudi I., Ben OuadaH.,Othmane A. (2017).** Cadmium effect on physiological responses of the tolerant *Chlorophyta specie Picocystis sp.* isolated from Tunisian wastewaters, *Environmental Science and Pollution Research*, 24(2) :1803-1810.
- Ben Amor, H. B. (2015).** Etude et optimisation de bioaccumulation de Mg^{2+} dans les microalgues «*Chlorellavulgaris* ». Th. Doc :Univ. Paris-Saclay ; Univ de Sfax (Tunisie).216p.
- Benguedda-Rahhal W. (2012).** Contribution à l’étude de la bioaccumulation métallique dans les sédiments et différents maillons de la chaîne trophique du littoral extrême ouest algérien. Th. Doc: Univ.Tlemcen.Algérie. 146p.
- Bergasa O. (2009).** Study of metals concentrations levels in *Patella piperata* through the Canary Islands Spain,*Fresenius Environmental Bulletin*,(15):1234- 1240.
- Boudin N.(2005).** Contamination des crustacés décapodes par les composés organohalogénés: Etude détaillée de la bioaccumulation des PCB chez l'araignée de mer *Maja Brachudactyla*. Th. Doc : univ. Bretagne Occidentale.France.309p.
- Bougaran G., Saint-Jean B. (2014).** Microalgues : de petits végétaux aux grandes promesses !*Biofutur*, (360) : 28-31.
- Boumnich L., Dauta A., Devaux J., & Romagoux J. C. (1990).** Influence de la lumière et de la température sur la croissance de quatre espèces d'algues d'un lac eutrophe (Lac d'Aydat, Puy de Dôme, France),In *Annales de Limnologie-International Journal of Limnology*, 26(1) : 3-10.
- BoursafiS. (2014).** Evaluation de la contamination métallique dans trois organes (foie, gonades et muscles) de Rouget de Roche *Mullus Surmuletus* par quatre métaux lourds (Zn, Cu, Cd et Pb) pêché dans la baie d’Oran. Th. Doc : Univ.Oran.Algérie .202p.

Bresson C., Esnouf S., Lamouroux C., Solari P.L., Den Auwer C. (2006).XAS Investigation of biorelevant cobalt complexes in aqueous media, *New Journal of Chemistry*, 30(3): 416-424.

Brown M. R., Jeffrey S. W., Volkman J. K., Dunstan G. A.(1997).Nutritional properties of microalgae for mariculture, *Aquaculture*, 151(1-4): 315-331.

-C-

Cadoret J. P., Bernard O. (2008). La production de biocarburant lipidique avec des microalgues: promesses et défis,*Journal de la Société de Biologie*, 202(3) :201-211.

Calamari D, Naeve H. (1994). Revue de la pollution dans l'environnement aquatique africain, Document *technique du CPCA*, N°25, Rome, FAO : 31-69.

Casas S. (2005). Modélisation de la bioaccumulation de métaux traces (Hg, Cd Pb, Cu et Zn) chez la moule *Mytilusgalloprovincialis*, en milieu méditerranéen. Th. Doc :Univ. Sud Toulon. France.346 p.

CedenoMaldonado A.,Swader J.A (1974). Études sur le mécanisme de la toxicité du cuivre chez *Chlorella*, *Weed Science* ,22(5) :443-449.

ChebiraN. A. S. (2008).Etude expérimentale de l'élimination des polluants organiques et inorganiques par adsorption sur des sous-produits de céréales. Th. Doc :Univ.Constantine. Algérie.178p.

Chouikhi A. (2013). Les applications potentielles des macroalgues marines et les activités pharmacologiques de leurs métabolites : Revue. USTHB-FBS-4th International Congress of the Populations & Animal Communities, *Dynamics& Biodiversity of the terrestrial & aquatic Ecosystems* CIPCA4 TAGHIT (Bechar), Algeria: 40 p.

Chouti W., Mama D., AlapiniF. (2010). Etude des variations spatio-temporelles de la pollution des eaux de la lagune de Porto-Novo (sud Bénin),*International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 4(4) : 1017-1029.

Cid A., Herrero C., Torres E., AbaldeJ. (1997). Copper toxicity on the marine microalga *Phaeodactylumtricornutum*: effects on photosynthesis and related parameters,*Aquatic toxicology*,31(2) :165-174.

Clemens S. (2001). Molecular mechanisms of plant metal tolerance and homeostasis,*Planta*,

212 :475–486.

Compaoré E., Nanéma L. S. (2010). Compostage et qualité du compost de déchets urbains solides de la ville de Bobo-Dioulasso, Burkina Faso, *Tropicultura*, 28(4) : 232-237.

Coulibaly A. S., Monde S., Wognin V. A., Aka K. (2009). Analyse des éléments traces métalliques (ETM) dans les baies estuariennes d'Abidjan en Côte d'Ivoire, *Afrique sciences*, 5(3) : 77-96.

-D-

Darmendrial D. Baize, J. Freyssinet P., Mouvet C., Salpéteur I., WarverP. (2000). Fonds géochimique naturel : Etat des connaissances à l'échelle nationale, *INRA BRMG/RP-50518-FR* :95p.

Doillon D. (2010). Déterminants moléculaires de la tolérance au zinc des microorganismes eucaryotes. Th. Doc : Univ .HenriPoincaré. France. 223p.

Doré-Deschênes F. (2009). Utilisation des microalgues comme source d'énergie durable. Centre universitaire de formation en environnement. Th. Doc : Univ. Sherbrooke. Canada. 111 p.

Dos Santos R.W., Schmidt É. C., Bouzon L. Z. (2013). Changes in ultrastructure and cytochemistry of the agarophyte *Gracilariadomingensis* (*Rhodophyta, Gracilariales*) treated with cadmium, *Protoplasma*, 250(1): 297-305.

Dusquene S. (1992). Bioaccumulation métallique et métallothioneines chez trois espèces de poissons du littoral Nord-Pas De Calais. Th de Doc : en Biologie et Santé. Univ. Lille. France. 263 p.

-E-

El-Sheekh M.M., El-Naggar A.H., Osman M.E.H., El-Mazaly E. (2003). Effect of cobalt on growth, pigments and the photosynthetic electron transport in *Monoraphidium minutum* and *Nitzschia perminuta* Braz., *Journal of Plant Physiology*, 15(3) :159-166.

-F-

Filali R. (2012). Estimation et commande robustes de culture de microalgues pour la valorisation biologique de CO₂. Th. Doc : Univ . Nantes. France .219 p.

-G-

- Garon-Ladiere S. (2004).** Etude structurale des polysaccharides pariétaux de l'algue rouge *Asparagopsis armata*, *Bonnemaisoniales*, 15 :332p.
- Gaur J.P., et Rai L.C. (2001).** Heavy Metal Tolerance in Algal Adaptation to Environmental Stresses, *Ed. Springer, Berlin Heidelberg*. pp : 363–388.
- Gaujous D. (1993).** La pollution des milieux aquatiques : aide-mémoire Technique et documentation, *Ed Lavoisier*, Paris. 220 p.
- Genevés L. (1992).** Reproduction et développement des végétaux, *Ed. Dunod*, Paris. pp: 5-9.
- Gérard É. (2000).** Caractérisation du cadmium phytodisponible des sols par méthodes isotopiques. Th. Doc : Institut National Polytechnique de Lorraine. France .171p.
- Gevaert F, Creach A, Davoult D, Kling R., Lemoine Y. (2001).** Réponses des grandes algues marines *Laminaria saccharina* aux variations d'irradiance lors d'un cycle de marée simulé : photoinhibition et photoprotection (résultats préliminaires), *Journal de Recherche Océanographique*, 16(1-2) : 9–17.
- Galvez-Cloutier R., Lefrançois P. J. (2005).** Les sols contaminés par des métaux lourds : Distribution géochimique et techniques de restauration (Première partie), *Vecteur environnement*, 38(3).
- Gouin C. A., Aka N., Adiaffi B., Bamba B. S., Soro N. (2016).** Pollution saisonnière des sédiments de lagune par des métaux lourds (Cu, Pb et Zn) en zone tropicale humide : cas de la lagune Mondoukou (Sud-Est de la Côte d'Ivoire), *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 10(2) :835-845.
- Granum E., Raven J. A. Leegood R. C. (2005).** How do marine diatoms can fix 10 billion tonnes of inorganic carbon per year? , *Journal of Botany*, (83):898-908.
- Gruloise D. (2010).** Etude de la dispersion et du recrutement à différentes échelles spatiales chez *Undaria pinnatifida*, une macro-algue introduite le long des côtes bretonne. Th. Doc : Univ. Vivant. France. 396 p.
- Guedenon P., Edorh P. A., Hounkpatin A. S., Alimbi C. G., Ogunkanmi A., Boko M. (2011).** Détermination in vitro de la concentration létale médiane du cadmium sur le poisson de l'espèce *Clarias gariepinus*, *International Journal of Biology and Chemistry Science*, 5(6): 2497-2501.

Hlavay J., Polyak K., Weisz M. (2001). Monitoring of the natural environment by chemical speciation of elements in aerosol and sediment samples Presented at the Whistler 2000 Speciation Symposium, *Journal of Environmental Monitoring*, 3(1): 74-80.

Herzi F. (2013). Caractérisation chimique des exsudats du dinoflagellé marin toxique *Alexandriumcatenella* et de la diatomée marine *Skeletonemacostatum* et étude de la réponse protéomique d'*Alexandriumcatenella* en conditions de stress métalliques. Th. Doc. Univ. Toulon. 170p.

-k-

Kalia K., Flora S. J. (2005). Strategies for safe and effective therapeutic measures for chronic arsenic and lead poisoning, *Journal of occupational health*, 47(1):1-21.

Kaimoussi A., Mouzdahir A., Saih A. (2004). Variations saisonnières des teneurs en métaux (Cd, Cu, Fe, Mn et Zn) chez l'algue *Ulva lactuca* prélevée au niveau du littoral de la ville d'El Jadida (Maroc), *Comptes Rendus Biologies*, 327 :361–369.

Knauer K., Behra R., Sigg L. (1997). Adsorption and Uptake of Copper by the Green Alga *Scenedesmus Subspicatus* (chlorophyta) 1, *Journal of Phycology*, 33(4):596-601.

Krzyszowska M. (2010). The cell wall in plant cell response to trace metals: polysaccharide remodeling and its role in defense strategy, *Acta Physiologiae Plantarum*, 33: 35–51.

-L-

Lavoie M. (2010). Toxiques les métaux ? Les modèles écotoxicologiques aident à y voir plus clair, *Capsules INRS Science*, (9) : 1-7.

Lenoble V. (2003). Elimination de l'Arsenic pour la production d'eau potable : oxydation chimique et adsorption sur des substrats solides innovants. Th. Doc : Univ. Limoges. France. 177p.

Leonardo T. (2014). Mécanismes d'accumulation et impact biologique de l'argent et du cobalt chez la micro-algue *Coccomyxa actinabiotis*. Th. Doc: Univ. Grenoble. France. 333p.

Loez C. R., Saliban A., Topalian M. L. (1998). Phytoplanktonic associations as indicators of zinc pollution, *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 11(3): 315–332.

-M-

Macfie S.M., Tarmohamed Y., and Welbourn P.M. (1994). Effects of cadmium, cobalt, copper, and nickel on growth of the green alga *Chlamydomonas reinhardtii*: The influences the cell wall and pH, *Archives Environment Contamination and Toxicologie*, 27: 454–458.

Marchand M. (1989). La contamination des eaux continentales par les micropolluants organiques, *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*, 2(2) :229-264.

Maruszczak N. (2010). Etude du transfert du mercure et du méthylmercure dans les écosystèmes lacustres alpins. Th. Doc: Univ. Grenoble. France. 207p.

Mckenzie A. B. (1997). Isotope evidence of the relative retention and mobility of lead, and radiocesium in swtthombrophic peats, *The science of the total environment*, 203(2) :115-127.

McKnight D.M., Morel F.M. (1979). Release of weak and strong copper-complexing agents by algae, *Limnol Ocean*, 24: 823–837.

Megatli S., Semsari S., Coudrechet M., (2009). Toxicity and removal of heavy metals (Cd, Cu Zn) by *Lemnagibba*, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 72: 1774- 1780.

Michel T., Destandau E., LeFloch G., Lucchesi M. E., Elfakir C. (2012). Antimicrobial, antioxidant and phytochemical investigations of sea buckthorn (*Hippophaë rhamnoides* L.), *Food Chemistry*, 131(3): 754-760.

Michel, P. (1993). L'arsenic en milieu marin. Biogéochimie et écotoxicologie, *Ed. services éditions, poulazané*. pp :47-50.

Morlon H. (2005). Mécanismes de prise en charge du sélénite-Se (IV)-chez l'algue verte unicellulaire *Chlamydomonas reinhardtii*. Bioaccumulation et effets induits sur la croissance et l'ultrastructure. Th. Doc : Univ. Bordeaux I. France .160 p.

Muller-Feuga A. (1997). Microalgues marines : Les enjeux de la recherche. *Ed. Ifremer, Plouzané, France*, 35 p.

-N-

Naessens M., Leclerc J.-C., and Tran-Minh C. (2000). Fiber optic biosensor using *Chlorella vulgaris* for determination of toxic compounds, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 46 :181–185.

Nguyen-Deroche T. L. N (2008). Effets du cuivre et du zinc sur la photosynthèse et le métabolisme d'une cyanobactérie et de diatomées marines du littoral vietnamien ;

comparaison avec des espèces de la côte atlantique française. Th. Doc : Univ.Maine.France.176p.

Nguyen-Deroche T. L. N., Caruso A., Le Thi T., Viet Bui T., Schoefs B., Tremblin G., Moratn-Manceau A. (2012).Zinc affects differently growth, photosynthesis, antioxidant enzyme activities and phytochelatin synthase expression of four marine diatoms,*Scientific World Journal* , 2012 : 14.

Nys Y. (2001).Oligo-éléments, croissance et santé du poulet de chair,*Productions animals*, 14(3) : 171-180.

-O-

Ortiz J., Romero N., Robert P., Araya J., Lopez-Hernandez J., Bozzo C., Navarrete, E., Osorio A. and Rios A. (2006). Dietary fiber, amino acid, fatty acid and tocopherol contents of the edible seaweeds *Ulva lactuca* and *Durvillaea Antarctica*,*Food chemistry*,99: 98-104.

Ouro-Sama K., Solitoke. H.D., Gnandi K., Afiademanyo K., Bowessidjaou E.J., (2014).Évaluation et risques sanitaires de la bioaccumulation de métaux lourds chez des espèces halieutiques du système lagunaire togolais, *Open Edition (Vertigo)*, 14(2).

Overnell J. (1975). The effect of heavy metals on photosynthesis and loss of cell potassium in two species of marine algae, *Dunaliella tertiolecta* and *Phaeodactylum tricoratum*,*Marine Biology*, 29(1) : 99-103.

Ozenda P. (2000). Les végétaux : Organisation et diversité biologique, *Ed. Dunod*.Paris. pp 61-78.

-P-

Padua M. GPS., Mathias L.A. (2004).Chemical composition of *Ulvaria oxysperma* (Kützinger) Bliding, *Ulva lactuca* (Linnaeus) and *Ulva fasciata* (Delile), *Brazilian Archives of Biology and Technology*,47 :49-55.

Palit S., Sharma A., Talukder G. (1994). Effects of Cobalt on Plants,*The botanical review*, 60(2) :149-181.

Pencreac'h G., Devos M., Poisson L., Herault J., Loiseau C., Ergon F. (2004).Les microalgues marines : source alternative d'acide eicosapentaénoïque (EPA) et d'acide docosahexaénoïque (DHA), *Oléagineux, Corps gras, Lipides*, 11(2) : 118-122.

Penen F. (2015). Imagerie cellulaire du stress métallique induit par le cadmium chez la micro-algue verte *Chlamydomonas reinhardtii* par techniques synchrotron μ XRF/XAS et nanoSIMS. Th. Doc :Univ.L'Adour. France. 234p.

Perrein-Ettajani H., Amiard J. C., Haure J., & Renaud, C. (1999). Effects of metals (Ag, Cd, Cu) on the biochemical composition and compartmentalization of these metals in two microalgae *Skeletonema costatum* and *Tetraselmis suecica*, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 56(10) :1757-1765.

Person J. (2010). Livre Turquoise – Algues, filières du futur, Ed. AdebioTech Romainville, Paris .163 p.

Picaud C. (2017). Oligo-éléments : excès, carences et conseil officinal. Th. Doc : Univ.Limoges. France. 145 p.

Pillai S., Behra R., Nestler H., Suter M.J.-F., Sigg L., Schirmer K. (2014). Linking toxicity and adaptive responses across the transcriptome, proteome, and phenotype of *Chlamydomonas reinhardtii* exposed to silver, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(9) :3490-3495.

Praud A. (1994). Isolement, caractérisation structurale et analyse de nouveaux métabolites d'algues méditerranéennes appartenant aux genres *Cystoseira* et *Lyngbya*. Th. Doc : Univ. Aix-Marseille 1. France. 186 p.

Priac A., Lactuca sativa L., (2014). Evaluation écotoxicologique de rejets industriels complexes et de solutions synthétiques. Th. Doc:Univ.Franche-Comté. France.252p.

Pulz O., Gross W., 2004. Valuable products from biotechnology of microalgae, *Applied Microbiology and Biotechnology*, 65:635–648.

-R-

Ramade F., (1998). Dictionnaire encyclopédique des Sciences de l'eau, Ed.Science.Paris.785p

-S-

Sasson, A. (1998). L'exploitation industrielle des microalgues, *Biofutur*, 1998(179) : 64-65.

Serpaud B., Al-Shukry R., Casteignau M., Matejka G. (1994). Adsorption des métaux lourds (Cu, Zn, Cd et Pb) par les sédiments superficiels d'un cours d'eau: rôle du pH, de la température et de la composition du sédiment. *Revue des sciences de l'eau, Journal of Water Science*, 7(4) : 343-365.

Sies H. (1997). Oxidative stress: oxidants and antioxidants, *Experimental Physiology: Translation and Integration*, 82(2): 291-295.

Squinazi F. (2020). Synthèse : Les effets du plomb sur la santé, *Environnement Risques & Santé*, 5 (1) : 26.

Smith M. A. (1983). The effect of heavy metals on the cytoplasmic fine structure of *Skeletonemacostatum* (Bacillariophyta), *Protoplasma*, 116(1): 14-23.

Synytysya A., Choi DJ., Pohl R., Na YS., Capek P., Lattová E., (2015). Structural Features and Anti-Coagulant Activity of the Sulphated Polysaccharide SPS-CF from a Green Alga *Capsosiphonfulvescens*, *Biotechnology*, 17(6):718-35.

-V-

Ventura M.R., Castanon J.I.R. (1998). The nutritive value of seaweed (*Ulva lactuca*) for goats, *Small Ruminant Research*, 29: 325-327.

Vivien R., Lafont M., Perfetta J. (2011). Proposition d'un seuil de toxicité des métaux lourds des sédiments mis en évidence par les vers oligochètes dans quelques cours d'eau, *Bulletin de la Société vaudoise des sciences naturelles*, 92 :153-164

-W-

Wang W. (1987). Factors affecting metal toxicity to (and accumulation by) aquatic organisms – overview, *Environment international*, 13: 437-457.

Wijesinghe W.A.J.P. JYJ. (2011). Biological activities and potential cosmeceutical applications of bioactive components from brown seaweeds, *a review Phytochemistry Reviews*, 10:431-443.

-Y-

Yoshimura E., Nagasaka S., Sato Y., Satake, K., and Mori S. (1999). Extraordinary High

Aluminium Tolerance of the Acidophilic Thermophilic Alga, *Cyanidium caldarium*, *Soil science and plant nutrition*, 45:721–724.

-Z-

Zeerleder A., Solioz M., Abicht H. K., Murlane F. (2010). Le cuivre—sur la trace d'un oligoélément, In *Forum Médical Suisse*, 10(22) : 379-383.

Les sites internet

1(http://botany.natur.cuni.cz/algo/CAUP/H1955_Chlorella_vulgaris.htm)

2(<http://www.ecosociosystemes.fr>)

3 (<http://protist.i.hosei.ac.jp>)

4 (<https://fr.wikipedia.org/wiki/Euglenophyceae>)

5 (<http://www.set-revue.fr/que-sait-de-la-biodisponibilite-des-contaminants-dissous-dans-le-milieu-aquatique>)

Effets toxiques des métaux lourds sur les microalgues aquatiques

Membres de Jury Réalisé par :

Présidente : Dr. OUNAS I.

MESSAHLI Imane

Examinateur : Dr. ZOUAGHI F.

SAIDANI Assia

Promotrice : Mme. BENHAMADA O.SALMI Lynda

Résumé

Les activités industrielles génèrent de grandes quantités d'eau contaminée particulièrement par les métaux lourds, à cause de leur non biodégradabilité et leur pouvoir d'accumulation à travers le réseau trophique, ces métaux causent des sérieux problèmes induisant un déséquilibre des écosystèmes aquatiques.

Les microalgues représentant le premier maillon de la chaîne trophique jouent un rôle important dans le fonctionnement et l'équilibre des écosystèmes aquatiques. La présence des métaux lourds à fortes concentrations peut avoir des effets dévastateurs non seulement sur l'équilibre écologique de l'environnement récipiendaire, mais aussi sur une diversité d'organismes aquatiques particulièrement les microalgues.

L'objectif de notre travail est de savoir le mécanisme de toxicité des métaux lourds sur les microalgues à savoir la croissance, le stress oxydatif et la perturbation des autres fonctions.

Mots clés : écosystème aquatique, métaux lourds, microalgues, accumulation, Effet toxique.

Abstract:

Industrial activities generate large quantities of water contaminated particularly by heavy metals, because of their non-biodegradability and their ability to accumulate through the food web, these metals cause serious problems inducing an imbalance in aquatic ecosystems.

Microalgae, representing the first link in the trophic chain, play an important role in the functioning and balance of aquatic ecosystems. The presence of heavy metals in high concentrations can have devastating effects not only on the ecological balance of the recipient environment, but also on a variety of aquatic organisms, particularly microalgae.

The objective of our work is to know the mechanism of toxicity of heavy metals on microalgae, namely growth, oxidative stress and disruption of other functions.

Key words: aquatic ecosystem, heavy metals, microalgae, accumulation, toxic effect.

ملخص

تولد الأنشطة الصناعية كميات كبيرة من المياه الملوثة خاصة بالمعادن الثقيلة، بسبب عدم قابليتها للتحلل البيولوجي وقدرةها على التراكم عبر الشبكة الغذائية، تسبب هذه المعادن مشاكل خطيرة تتؤدي باختلال توازن نظام البيئة المائية

تلعب الطحالب الدقيقة، وهي الحلقة الأولى لسلسلة الغذاء، دوراً مهماً في أداء وتوازن النظام الإيكولوجي المائية. يمكن أن يكون لوجود المعادن الثقيلة بتركيز عالٍ آثار مدمرة تليس فقط على التوازن البيئي للبيئة المتلقية، ولكن أيضاً

علم مجموعة متمتدة من الكائنات المائية، وخاصة الطحالب الدقيقة

الهدف من عملنا هو معرفة آلية سمية المعادن الثقيلة على الطحالب الدقيقة، وهي النمو والإجهاد التأكسدي تعطيل الوظائف الأخرى

الكلمات المفتاحية: النظام البيئي المائي، المعادن الثقيلة، الطحالب الدقيقة، التراكم الحيوي، التأثير السام