



N° d'ordre :

N° de série :

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA

RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ECHAHID HAMMA LAKHDAR D'EL-OUED

FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE

DEPARTEMENT DE BIOLOGIE CELLULAIRE ET

MOLECULAIRE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de Master Académique

Filière : Sciences biologiques

Spécialité : Toxicologie

THEME

**Contribution a la bioremédiation des eaux uses
par des microalgues**

Présenté par :

LASSOUI Ahlem et SOLTANI Samer

Encadrer par : **KIRAM Abderrazak**

Année universitaire 2019/2020

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	<i>i</i>
DEDICACES	<i>ii</i>
RÉSUMÉ	<i>iii</i>
LISTE DES FIGURES.....	<i>iv</i>
LISTE DES TABLEAUX	<i>vi</i>
LIST D'ABREVIATION ET SIGNES	<i>vii</i>
Introduction	01

PARTIE THEORIQUE

Chapitre I- Revue de littérature

I-1 Généralités sur les microalgues	06
I-1.1 Qu'est-ce qu'une microalgue	06
I-1.2.Valorisation de la biomasse algale	06
□ Classification taxonomique des algues	06
□ Structure et physiologie.....	08
I-1.3. Utilisation des microalgues	09
I-1.4.Systèmes de culture des microalgues - Technologies de photobioréacteurs	11
1.4.1.Types de réacteurs :	11
1.4.2. Les paramètres de croissance	12
1.4.2.1. Eclairage et intensité lumineuse	13
1.4.2.2. conditions opérationnelles	13
□ Température	13
□ Salinité.....	14
Turbulence :	14
1.4.2.3.Besoins en éléments nutritifs	14
□Macronutriments incluant	14

Micronutriments incluant :	14
<input type="checkbox"/> Le pH.....	15
<input type="checkbox"/> Réseau d'air et gaz carbonique (l'aération).....	15
1.4.3.Les conditions de culture (mode de nutrition).....	15
1.4.3.1.Culture photoautotrophie	16
1.4.3.2.Culture hétérotrophe	16
1.4.3.3. Culture mixotrophique.....	16
I.1.5.Mécanisme de photosynthèse des microalgues	17
I.1.6. Dynamique de croissance des microalgues.....	19
1.6.1. Phase d'adaptation	19
1.6.2. Phase exponentielle	19
1.6.3. Phase stationnaire	19
1.6.4. Phase de déclin	20
I.3. Bioremediation.....	20
I.3.1.différents systèmes d'algues utilisés pour la bioremendiation	21
I.3.2.Systèmes de culture ouverts et fermés	22
<input type="checkbox"/> Systèmes "ouverts".....	22
<input type="checkbox"/> Systèmes "fermés".....	23
I.3.3.le Rôle des algues dans la détoxification des polluants organiques et des métaux lourds.....	24
I.3.4.Les mécanismes d'élimination des nutriments adoptés par les microalgues..	26
I.3.5.Le rôle des consortiums de microalgues dans l'élimination des polluants.....	27
I.3.6.Evolution des bactéries et des microalgues.....	28

Chapitre II Généralités sur les eaux usées

II.1 Définition des eaux usée.....	30
II.2.Les caractéristiques des eaux usées	30
II.3.Traitement des eaux usées	30

II.4.Composition des eaux usées et dangers connexes.....	31
II.4.1.Compositions biologiques.....	31
II.4.2.Compositions chimiques.....	31
II.5.Métaux lourds.....	32
II.7.Microalgues potentielles pour le traitement des eaux usées.....	32
II.8.1.Traitements des métaux lourds.....	33
II.8.2.L'épuration des eaux usées par les microalgues.....	34
9.2.1.PROCEDES D'EPURATIONS DES EAUX USEES :	36
<input type="checkbox"/> Prétraitement.....	36
<input type="checkbox"/> Dégrillage.....	36
<input type="checkbox"/> Déshuilage dégraissage.....	37
9.2.1.1.Traitement primaire (traitement physico-chimique).....	37
<input type="checkbox"/> DECANTATION :.....	38
<input type="checkbox"/> Coagulation-floculation.....	38
<input type="checkbox"/> Filtration.....	38
9.2.1.2. TRAITEMENT SECONDAIRE (EPURATION BIOLOGIQUE) :	38
<input type="checkbox"/> Procédés biologiques intensifs.....	39
<input type="checkbox"/> Procédés biologiques extensifs.....	39
9.2.1.3.TRAITEMENTS TERTIAIRES :	39
II.9.3.Les microalgues comme indicateurs de la qualité de l'eau.....	40

PARTIE PRATIQUE

CHAPITRE I-LA REGION D'ETUDES

I-1.Présentation des zones humides.....	43
1.1. Lacs d'Ouargla.....	43
Sebkha Oum Raneb.....	44
<input type="checkbox"/> Chott Ain Beida.....	45
<input type="checkbox"/> Les lacs Hassi Ben Abdallâh.....	45

1.2. Canal d'Oued Righ.....	45
<input type="checkbox"/> Climatologie.....	46
Etude des paramètres climatiques.....	47
1.2.1 Haut de L'Oued Righ (Région de Touggourt). :	47
CHAPITRE II : MATERIELS ET METHODES	
II-1-Matériels utilisé.....	52
1-2.MATERIEL NON BIOLOGIQUE :	52
<input type="checkbox"/> Matériel de laboratoire	52
<input type="checkbox"/> Matériel d'échantillonnage.....	52
II-2. Méthode utilisé.....	53
2-1.Méthode d'échantillonnage.....	53
<input type="checkbox"/> SOUCHES :	54
2-2.Analyses physicochimiques	55
2-2-1.Principaux paramètres physico-chimiques et mesurables.....	55
<input type="checkbox"/> Température	55
<input type="checkbox"/> PH.....	55
<input type="checkbox"/> Conductivité Electrique (EC).....	56
<input type="checkbox"/> Azote ammoniacal selon la norme : unité : mg/l NH ₄	56
<input type="checkbox"/> Nitrites : unité: mg/l NO ₂	56
<input type="checkbox"/> Silice (SiO ₂) : unité : mg/l SiO ₂	56
2-2-2.MILIEUX ET CONDITIONS DE CULTURE :	58
<input type="checkbox"/> LE MILIEU BG11	58
<input type="checkbox"/> Le milieu BBM.....	59
2-2-3.Ensemencements et conditions d'incubation	60
2-2-4.PROCEDURE D'ISOLEMENT :	61
<input type="checkbox"/> PHASE D'ENRICHISSEMENT :	61
2-2-5. CULTURE SUR MILIEU SOLIDE BG-11 ET BBM :	62

2-3-1. Conservation des souches	63
2-3-2.Déroulement des cultures.....	63
□ Comparaison des taux de croissance des différentes souches.....	63
1. Pré culture.....	63
2. Cultures.....	63

CHAPITRE III - RESULTATS ET DISCUSSION

V-1-RESULTATS DES ANALYSES PHYSICOCHIMIQUES :	65
V-2.Identification phenotypique	66
Conclusions	75
Liste des références	76



REMERCIEMENTS

Avant tout, nous tenons à remercier le bon DIEU qui a illuminé notre chemin et qui nous a armés de courage et de la volonté pour réaliser ce travail.

Nos remerciements en premier lieu à notre promoteur,

Monsieur Kiram Abderrazak.

Pour son aide, son suivi, ses encouragements et ses conseils durant notre travail.

Nous présentons nos remerciements aux membres de jury,

Et qu'ils trouvent ici notre haute considération pour avoir accepté d'examiner et de juger notre travail.

Enfin, tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin, que ce soit par leur amitié, leurs conseils ou leur soutien moral, trouveront dans ces quelques lignes l'expression de nos remerciements les plus vifs.

A tous, pour tous, Merci



DEDICACES

A ...

Mes parents qui me sont les plus chers au monde ;

Ce qui je ne pourrais jamais exprimer leur sacrifices, leur soutien moral et physique le long de mes années d'études.

Je demande à Dieu de les protéger et les garder pour moi.

Mes très chers frères

Mes très chers sœurs.

Toute ma famille.

Tous mes amis.

Ahlem et Samer



Résumé

Dans ce travail nous sommes intéressés à auditer la qualité d'eau usées traitées et les procédés qui s'appliquent dans la station d'épuration des eaux usées en appliquant des microalgues. L'objectif principal de notre travail était d'isoler et de caractériser des souches algériennes de microalgues. Après les résultats, les analyses physico-chimiques d'eaux ont montré que la température... Et les identifications phénotypiques dans des microalgues, on n'a pas pu continuer l'isolement des microalgues à cause de la pandémie covid19.

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : CLASSIFICATION DES MICROALGUES	07
Figure 2 : SCHEMA DE FONCTIONNEMENT D UNE micro-algue, intrants, produits, applications.	08
Figure 3 : STRUCTURES cellulaires d'une algue eucaryote..	09
Figure 4 : principale configurations des PBRs.	12
Figure 5 : diagramme des paramètres de croissance des microalgues	13
Figure 6 : mécanisme de photosynthèse chez Les microalgues	17
Figure 7 : diagramme de processus de la photosynthèse : réactions dépendante de la lumière et réactions sombres (cycle Calvin-Benson)	18
Figure 8 : zones humides de la cuvette d'Ouargla	44
Figure 9 : Haut de L'Oued Righ (Région de Touggourt).	46
Figure 10 : lac de Meggarine	48
Figure 11 : lac de Merjaja	48
Figure 12 : lac de Temacine.	49
Figure 13 : les points de prélèvements des échantillons (Région de Ouargla).	50
Figure 14 : les points de prélèvements des échantillons (Région de Touggourt). ..	50
Figure 15 : Passoire et corde utilisé	53
Figure 16 : la conservation des échantillons dans laboratoire de département.....	54
Figure 17 : methode d'échantillonnage.....	54
Figure 18 : la boite des réactifs colorimétrique pour l'analyse chimique.	57
Figure 19 : quelque analyse colorimétrique.	57
Figure 20 : préparation des solutions des milieux de la culture.....	59
Figure 21 : milieux de culture (solide et liquide).	60
Figure 22 : dispositions des boites de BBM et BG11sur les étagères de la chambre de culture des microalgues.	61
Figure 23 : milieux de culture solide BBM et BG11	61
Figure 24 : Cultures d'enrichissement	62
Figure 25 : Cultures sur milieu solide	63

Figure 26 : <i>PINNULARIA SP</i>	67
Figure 27 : <i>Mougeotia sp</i>	67
Figure 28 : <i>scendesmus sp</i>	68
Figure 29 : <i>oocystis sp</i>	68
Figure 30 : <i>Navicula</i>	69
Figure 31 : <i>Microcoleus</i>	70
Figure 32 : <i>Ankistrode smus</i>	70
Figure 33 : <i>Nitzschia</i>	71

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU1 : CONDUCTION DE CULTURE DES MICROALGUES.....	15
TABLEAU 2 : CONCENTRATION INITIAL.....	25
Tableau 3 :quelques etudes sur l"application des algues pour la biorestauration des metaux lourds.....	27
Tableau 4 : coordonnees des deux stations meteologiques.....	47
Tableau 5 : la situation de haut de l'oued righ (Région de Touggourt).....	49
Tableau 6 : la composition de milieu de BG11	58
Tableau 7 : LA COMPOSITION DE MILIEU BBM.....	59
Tableau 8 : RESULTAT DES ANALYSES PHYSICOCHIMIQUES.....	65
Tableau 9 : EDENTIFICATION DES ECHANTILLONS	66

LIST D'ABREVIATION ET SIGNES

AI : Autotrophic Index

BBM : Bold's Basal Medium

Ca Calcium

CCO₂: Contenu de CO₂.

Chl(a) : Chlorophyll (a) concentration

Co₂ Dioxyde de carbone

CO₂ : Dioxyde de carbone

CO₃-2: Carbonate

Cu Cuivre

DCO: Chemical Oxygen Demand

Fe: Fer

GHG : Greenhouse Gasses

H₂CO₃: Acide carbonique

H₂PO₄-: Dihydrogène de Phosphate

HCO₃ : Carbonate d'hydrogène

HCO₃- Bicarbonate

HPO₄ 2-: Hydrogène de Phosphate

HRAP High rate algal ponds

HRAPs : High Rate Algal Ponds

K Potassium

MC: Poids moléculaire du carbone

MCO₂: Poids moléculaire du dioxyde de carbone

Mg Magnésium

Mn Manganèse

MRBC : Multitrophic Rotating Biofilm Contactor

N Azote

Na₂SO₄ : Solution de sulfate

NH₃ Ammoniac

NO₃- Nitrate

O-PO₄- Ortho-phosphate

P Phosphate

P: Productivité Biomasse

RCO₂ : Taux de fixation du CO₂

S Soufre

SEM : Scanning Electron Microscope

TN : Azote Total

TP: Phosphore Total.

TSS : Total Suspended Solids

VSS : Volatile Suspended Solids

WWs : Synthetic wastewat

Introduction

Introduction

À échelle mondiale la demande en énergie est en forte croissance due au développement rapide des pays émergents, le changement climatique et le manque de ressources. Ceux-ci poussent le monde à chercher d'autres sources d'énergie capables de produire des combustibles alternatifs aux combustibles fossiles.

La crise de l'eau est considérée comme l'un des principaux problèmes et menaces mondiales, même si des ressources suffisantes en eau et en terres sont disponibles (CA 2007). Selon le Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des eaux (2014), plus de deux millions de tonnes d'eaux usées, de déchets agricoles et industriels sont déversées sans traitement dans les lacs, les rivières et autres plans d'eau des pays en développement, ce qui finit par polluer l'approvisionnement en eau utilisable. Presque tous les plans d'eau dans le monde sont fortement pollués en raison des rejets d'eaux usées industrielles et domestiques. Ces eaux usées non traitées fournissent divers nutriments organiques et inorganiques tels que l'azote (N) et le phosphore (P), pour les

Autotrophes, ce qui entraîne à son tour le processus d'eutrophisation dans les plans d'eau (Schindler et al.2008).

L'art de l'utilisation des algues (macro ou microalgues) dans l'élimination, la biotransformation ou la minéralisation de divers nutriments, métaux lourds et xénobiotiques des eaux usées et du dioxyde de carbone de l'air résiduel (Olguin et Sanchez-Galvan 2012) est connu sous le nom de phycoremédiation. Au cours de ce traitement, le carbone, l'azote, le phosphore et d'autres sels sont utilisés par les algues comme nutriments, des eaux usées ou de l'air selon le cas. D'autres polluants et xénobiotiques sont même pris en charge par les organismes par divers mécanismes cellulaires. Il s'agit d'un processus respectueux de l'environnement car il n'y a pas de pollution secondaire si la biomasse produite est récoltée pour être utilisée (Mulbry et al. 2008).

La littérature révèle que la technologie de biorestauration des algues (phycoremédiation) est très pertinente et a un potentiel immense pour de futures applications dans diverses stratégies d'élimination des déchets.

Au cours des dernières décennies, des recherches approfondies ont été menées sur le progrès biotechnologique des algues et ont réussi à mettre en place le système de dépollution des eaux usées en utilisant des algues, des microalgues en particulier, pour réduire un éventail de nutriments organiques, inorganiques et de certains produits chimiques hautement toxiques.

Les agents de phycoremédiation, les algues, sont des organismes photosynthétiques, capables de se développer dans des environnements extrêmement difficiles et difficiles. En outre, il existe divers rapports de recherche sur la séquestration de microalgues de divers métaux lourds dans leurs parois cellulaires par le biais d'un processus d'adsorption ou d'échange d'ions, comme moyen de biorestauration des métaux lourds (Priyadarshani et al. 2011) Au cours des dernières décennies, les technologies des algues ont été l'un des domaines les plus étudiés des sciences biologiques pour de nombreuses applications environnementales, biologiques, biomédicales et industrielles

À l'heure actuelle, Les chercheurs croient que la production à grande échelle des microalgues va aider à résoudre les problèmes de nourriture, énergie et santé publique. Cependant les techniques courantes sont très chères. La plupart des systèmes commerciaux de culture d'algues emploient des produits chimiques synthétiques chers en tant que sources nutritives pour la croissance d'algues .L'utilisation des microalgues pour l'épuration des eaux usées et la valorisation de la biomasse obtenue pour la production d'énergie est une optique à double intérêt.

Les microalgues donc suscitent un intérêt d'investissement mondial et Nous sommes ici dans le cadre de projets de bioremédiation où L'utilisation des microalgues pour l'épuration des eaux usées peuvent être réalisé .plusieurs espèces de microalgues ont la capacité de se développer dans des milieux contenant une faible concentration d'eau douce. Elles peuvent se développer dans les eaux saumâtres, salées et également dans les eaux usées. Les eaux usées contiennent de forte concentration d'azote et de phosphore et certaines, en fonction de leur provenance contiennent des métaux lourds. Cela pose un problème pour le traitement des eaux et c'est à ce niveau que les algues interviennent. Effectivement, les microalgues peuvent se développer dans des milieux riches en nutriments, elles vont pouvoir épurer un milieu riche en substrat. Elles permettent de diminuer le coût du traitement des eaux et également de réduire le phénomène d'eutrophisation lié aux fortes concentrations en azote et phosphore des eaux usées.

Les microalgues peuvent donc avoir un rôle important durant la phase tertiaire (dernière étape) du traitement des eaux, en assimilant l'azote et le phosphore présents en forte concentration dans cette étape. L'utilisation d'eaux usées d'origine domestique, agricole ou industrielle permet donc de diminuer les coûts de production de biocarburants issus des microalgues.. Leur utilisation est intéressante pour le marché des énergies renouvelables, mais aussi pour le secteur de la phycoremédiation, comme processus de séquestration du gaz carbonique face à la problématique des gaz à effet de serre, ou pour l'épuration des nutriments et des métaux contenus dans les eaux usées.

Dans ce travail, Nous visons à isoler des souches algériennes de microalgues à partir de différents sites et de sélectionner parmi les souches isolées celles qui sont prometteuses de ... et d'étudier la possibilité d'utiliser l'eau usée comme milieu de culture et de trouver un moyen de récupération économique de la biomasse algale.

1- Problématique

est ce que les microalgues ont une capacité importante pour éliminer les polluants chimiques qui trouve dans les eaux usées ?

Les expériences antérieures ont montré que les eaux usées peuvent supporter la croissance algale

L'effet de microalgue sur l'épuration des eaux usées

Milieu stérile pour

Le nombre de cellule en spectrométrie

le taux d'élimination pendant deux semaine

L'utilisation de plusieurs modes trophiques présente des avantages et inconvénients !

2- But et objectifs

Le but de ce projet est d'évaluer :

-Suivre la croissance du PH

-Du nombre de cellules en spectrométrie

-le taux d'élimination après l'incubation après deux semaines

-Mesurer la productivité d'une culture des souches en deux étapes, dans le même milieu de culture. La première étape sera réalisée en..

algues-bactéries dominés par *Sperulina* sp , cultivés dans leur milieu respectif à base

D'eaux usées industrielles. Ces consortiums ont été isolés de ces mêmes effluents, pour le projet lors de travaux antérieurs.

6 souches et la 7eme *Sperulina*

Les analyses DBO_5 entrées et sorties temps 0 et après 10 jours ...

Température, DBO_5 ..

La première étape consiste à favoriser une solution de métaux lourds le cadmium, le plomb, concentration déjà connue, et faire injecter les souches afin de connaître si positif ou négatif

Les réactions biologique ou biochimique qui se passent entre les bactéries et chaque élément, la dégradation d'azote de phosphore métaux lourds élimination.

PARTIE THEORIQUE

Chapitre I

Chapitre I- Revue de littérature

I-1 GENERALITES SUR LES MICROALGUES

I-1.1 QU'EST-CE QU'UNE MICROALGUE

Les algues désignent un ensemble d'organismes que l'on retrouve préférentiellement dans les milieux aquatiques. Les microalgues sont des microorganismes unicellulaires photosynthétiques qui utilisent la lumière du soleil comme source d'énergie pour fixer le dioxyde de carbone et elles contiennent la chlorophylle (PERSON, 2010). Ces organismes constituent un groupe polyphylétique et très diversifié de procaryote (les algues bleues ou cyanobactéries) et eucaryotes (où l'on retrouve les algues vertes, rouges et brunes). Le classement en divisions est basé sur diverses propriétés telles que la pigmentation, la nature chimique des produits de stockage issus de la photosynthèse, l'organisation des membranes photosynthétiques et d'autres caractéristiques morphologiques (PERSON, 2010). Elles ont la capacité de se développer rapidement dans des milieux et elles peuvent croître dans des conditions extrêmes (espèces halophiles dans les milieux très salés, espèces thermophiles dans les milieux très chauds).

Les microalgues sont présentes dans quasiment tous les écosystèmes terrestres, et il en existe une grande variété d'espèces (50000 à 1 million d'espèces estimées pour 30 000 étudiées)

I-1.2. Valorisation de la biomasse algale

➤ Classification taxonomique des algues

Les microalgues sont l'une des formes les plus primitives des plantes. Les algues appartiennent à des groupes diversifiés de micro-organismes photosynthétiques allant des unicellulaires (microalgues ou phytoplancton) aux multicellulaires (macroalgues ou filamenteuses) dont la taille est inférieure à 400 μm et dont le diamètre est normalement compris entre 1 et 30 μm (figure1) (Raheem et al., 2015; Sambusiti et al., 2015; Bharathiraja et al., 2015).

Chapitre I- Revue de littérature

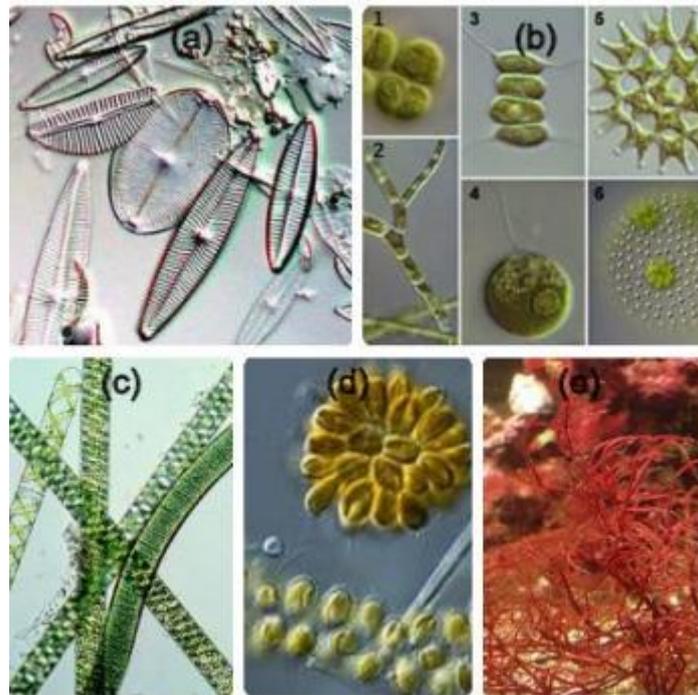


Figure 1 : CLASSIFICATION DES MICROALGUES (a) les diatomées (Bacillariophyceae); (b) vert (Chlorophyceae): [1. Desmotetra, 2. Stigeoclonium, 3. Desmodesmus, 4. Chlamydomonas, 5. Pediastrum, 6. Volvox]; (c) les cyanobactéries bleues et bleu-vert (Cyanophyceae); (d) doré (Chrysophyceae); et (e) des algues rouges (Rhodophyceae)

Les biologistes ont classé les microalgues en fonction de leur cycle de vie, leur structure cellulaire de base et de la variation de leur pigmentation photosynthétique, à savoir les algues vertes, bleue-vertes, rouges, brunes et dorées (Chen et al., 2015).

Les classes les plus importantes de microalgues en termes d'abondance sont illustrées dans la Figure I.1: (a) les diatomées (Bacillariophyceae); (b) vert (Chlorophyceae); (c) les cyanobactéries bleues et bleu-verte (Cyanophyceae); (d) doré (Chrysophyceae); et (e) des algues rouges (Rhodophyceae) (Vassilev et al., 2016). En effet, les diatomées représentent la forme de vie la plus dominante et le groupe le plus producteur de biomasse sur Terre (Demirbas et al., 2011). Les microalgues, diatomées et cyanobactéries ont des tailles de cellules allant de 0,5-200 μm et adoptent différentes formes: allongées, filamenteuses ou sphériques (Gerardo et al., 2015). En outre, ces micro-organismes peuvent être regroupés en photosynthétiques, non-photosynthétiques, autotrophes, hétérotrophes, mixotrophiques, procaryotes et eucaryotes (Sambusiti et al., 2015; Bharathiraja et al., 2015). Par conséquent, ces micro-organismes contenant de la chlorophylle simple sont capables de capturer le CO_2 émis de sources variées et de le convertir en biomasse algale, pendant la photosynthèse, en

Chapitre I- Revue de littérature

présence de la lumière, l'eau, les nutriments et la température appropriée (Sambusiti et al., 2015; Bharathiraja et al., 2015). On estime environ 55 000 espèces et plus de 100 000 souches d'algues disponibles dans différents écosystèmes marines, saumâtres, d'eau douce et terrestres (Bharathiraja et al., 2015). Récemment, l'accent a été mis sur l'utilisation de la biomasse algale pour diverses applications bénéfiques, y compris le traitement des eaux usées et la production de bioénergie (biocarburants) (Rosenberg et al., 2008).

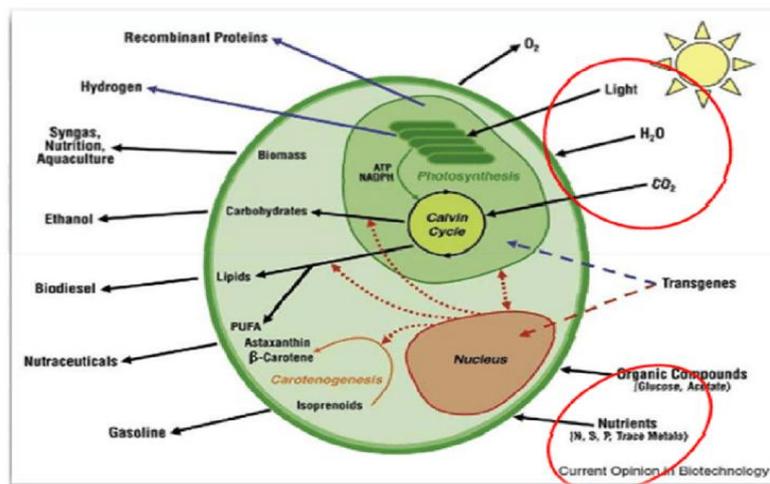


Figure 2 : SCHEMA DE FONCTIONNEMENT D UNE micro-algue, intrants, produits, applications. (PERSON, 2010)

➤ STRUCTURE ET PHYSIOLOGIE

Les microalgues mesurent de quelques micromètres à plusieurs centaines de micromètres, selon les espèces (BOILEAU, 2015). Elles présentent une très grande diversité de molécules au sein de leurs cellules (Figure 2 et 3). Cette biomasse se différencie principalement des autres végétaux par sa richesse en lipides qui pouvant atteindre jusqu'à 80 % de leur poids sec, et ils sont principalement sous forme des triglycérides (Cantin, juillet 2010), en protéines, en vitamines (B1, B6, B12, C, E, K1), en pigments tels que les caroténoïdes (1% à 2%) et en antioxydants (PERSON, 2010).

C'est dans les chloroplastes, et plus précisément dans les membranes thylacoïdales, que se déroule la réaction d'oxydoréduction qui permet de réduire le dioxyde de carbone à partir de l'hydrogène de l'eau en sucres simples et en oxygène. La Figure 2 présente les principales structures des cellules algales eucaryotes.

Chapitre I- Revue de littérature

La membrane plasmique est une structure composée de polysaccharides et de protéines plus ou moins complexes et en proportions variables selon les espèces. Elle est chargée négativement, ce qui est attribuable à la composition des groupes fonctionnels qui y sont associés. Elle confère aux cellules une certaine résistance aux ions métalliques potentiellement toxiques, ce qui motive leur utilisation pour le traitement des eaux. Les microalgues ont démontré une certaine capacité à accumuler rapidement les lipides, ce qui leur a permis de se profiler dans le domaine des biocarburants de 3^{ème} génération. (BOILEAU, 2015).

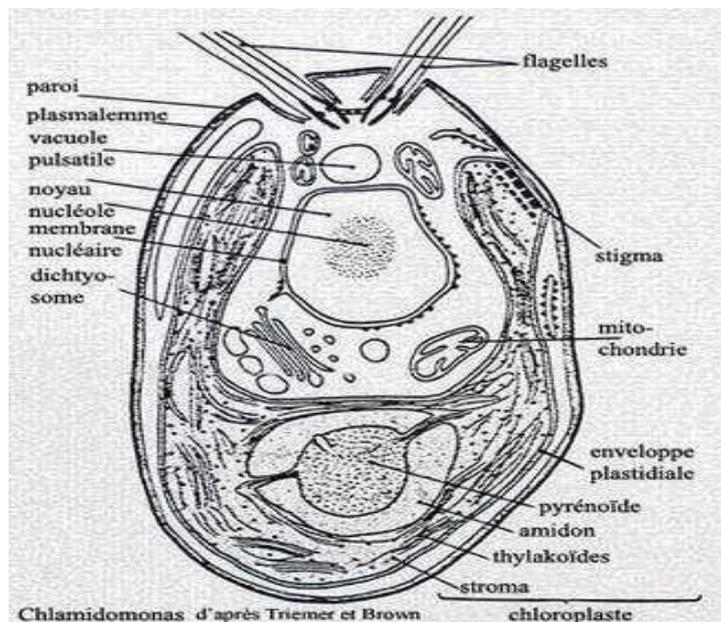


Figure 3 : STRUCTURES cellulaires d'une algue eucaryote (BOILEAU, 2015) ont démontré une certaine capacité à accumuler rapidement les lipides, ce qui leur a permis de se profiler dans le domaine des biocarburants de 3^{ème} génération. (BOILEAU, 2015).

I-1.3. Utilisation des microalgues

Les microalgues ont pour principale fonction de convertir l'énergie solaire en énergie chimique en présence d'eau et de synthétiser en fin de parcours les métabolites organiques primaires. En effet à partir d'un minimum d'éléments minéraux (quelques microgrammes par litre), en présence de lumière, elles sont capables de rendre tout système abiotique viable. Lors du mécanisme photochimique qu'on appelle photosynthèse, l'essentiel des composants organiques est fabriqué (glucides, lipides, protéines) (Chader, 2003).

C'est de là que le rôle des microalgues dans la nature est déterminé et qu'émerge leur utilisation dans divers domaines :

Chapitre I- Revue de littérature

-Dans les océans, les microalgues sont considérées comme étant le premier maillon de la chaîne alimentaire (Chader, 2003). Elles jouent un rôle primordial dans le cycle de carbone et d'azote, ce sont les contributeurs majeurs dans la production de biomasse. Malgré leur petite taille, la biomasse végétale produite par l'effet combiné de milliards de cellules est beaucoup plus importante que celle consommée par les animaux. L'énergie utilisée par toutes les espèces de la chaîne alimentaire est issue des biomolécules synthétisées par ces organismes microscopiques (Hoff et al., 2001).

-Les microalgues présentent une source potentielle de protéine alimentaire (50 à 60 % du poids sec) et d'acides gras essentiels non négligeable et de vitamines (Chader et al., 2001). Plusieurs espèces ont été sélectionnées pour la production industrielle de biomasse algale dans le but d'une application économique dans l'alimentation humaine et animale. La production mondiale annuelle à l'an 2000 à dépasser les 2000 tonnes par an pour les chlorelles et les spirulines (Richmond, 2004).

-En agriculture, les microalgues sont utilisées comme engrais biologique pour la fertilisation des sols pauvres, en particulier les sols sahariens squelettiques dont la structure est amoindrie par l'abondance des ions sodium dans l'eau d'irrigation, ce qui engendre des conditions asphyxiantes très défavorables ; ainsi l'apport d'algues microscopiques riches en azote à ce type de sol, peut corriger l'insuffisance en matière organiques. (Chader et al, 2001).

Les microalgues sont source de produits variés, certaines catégories de produits chimiques leurs sont propres: agar-agar, alginates, carraghénanes et bien d'autres polysaccharides. Certaines sont capables de s'adapter à des salinités importantes en accumulant dans leurs cellules du glycérol (*Dunaliella*), du sorbitol (*Stichococcus*), du mannitol (*platynomas*) (Richmond,2004)

-Les microalgues sont employées pour produire de nombreuses molécules bioactives de grande importance (Borowitzka, 1986; Bubrick, 1991; Pulz et al., 2001; Li et al., 2001; Banerjee et al., 2002).

Elles sont utilisées en médecine et en industrie pharmaceutique : utilisation thérapeutique, allopathique ou homéopathique et dans la production de produits cosmétiques (Chader, 2003).

-Dans le domaine de l'environnement, le développement des procédés de détection d'algues toxiques est identifié comme un important progrès, et devrait donner lieu à une action

Chapitre I- Revue de littérature

de recherche identifiée. La production des toxines est à envisager au même titre que celle des autres molécules bioactives (Hadjadji, 2009).

-Epuración des eaux usées : par l'incorporation dans les cellules d'algues les sels minéraux en excès comme le phosphore et l'azote (Chader, 2003), ainsi que la régulation du pH. Elles sont considérées comme bio filtre (Blackburn, 2004 ; Hoff et al., 2001). Mieux encore, les microalgues sont aujourd'hui impliquées dans la production d'énergies nouvelles et renouvelables notamment la production : d'hydrogène démontré par différents travaux dans le monde, en Algérie l'étude de mécanisme de production biologique d'hydrogène par la microalgue verte *Chlorella*, privée à la fois d'oxygène et de soufre, à montrer que cette microalgue pourrait être le siège d'une production d'hydrogène gazeux ce pendant plusieurs jours et (chader, 2009). De biocarburant -L'utilisation des microalgues ne se limite pas à ce que l'on vient de citer, grâce aux propriétés diverses qu'elles présentent, le développement technologique les a impliquées dans de nouvelles frontières biotechnologiques ainsi que de nouveaux projets de recherche tels. que la modification génétique des cyanobactéries (Williams, 1988 ; Vermaas, 1996, 1998) et la production de protéines recombinées (Qingfang He, 2004).

I-1.4.Systèmes de culture des microalgues -Technologies de photobioréacteurs

1.4.1.Types de réacteurs

La sélection du système de culture des microalgues est la clé d'une élimination efficace et pratique des nutriments à partir des eaux usées et une production élevée de la biomasse (Razzak et al., 2017).

Généralement, les systèmes de cultures de microalgues diffèrent principalement selon le coût, le type de produits désirés et la source de nutriments. Ces systèmes sont généralement classés selon leurs conditions de conception en tant que systèmes "ouverts" ou "fermés" (Razzak et al., 2017).

En effet, les photobioréacteurs "fermés" (PBR) pour la croissance des microalgues sont plus avantageux parce que les conditions de culture sont strictement contrôlées et optimisées afin d'atteindre des concentrations cellulaires plus élevées (Gonçalves et al., 2017). En plus, l'évaporation et les contaminations sont facilement évitées. Ainsi, plusieurs configurations classiques de systèmes fermés sont mentionnées dans la Figure 4 telles que la colonne à bulles, l'airlift, les PBRs tubulaires (horizontaux et hélicoïdaux), la plaque plane (Kumar et al., 2011). Malgré ces avantages, les PBRs présentent certaines limites en termes de sur-

Chapitre I- Revue de littérature

chauffage, des difficultés de mise à l'échelle industrielle causées par l'accrochage de la biomasse et des coûts de construction plus élevés (Posten et al., 2009).

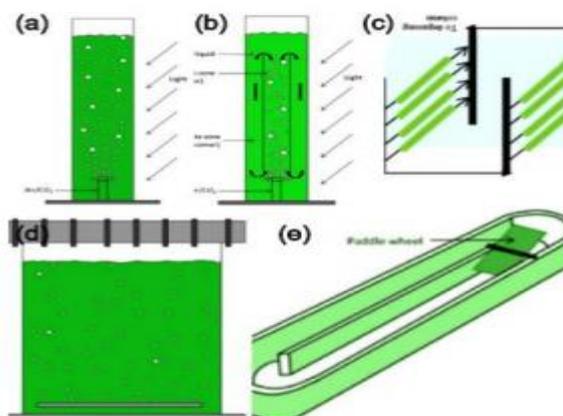


Figure 4 : principale configurations des PBRs: (a) Colonne à bulles; (b) Air-lift; (c) PBR tubulaires, (d) Plaque plane, (e) Etang Raceway(Yadav et al., 2017).

D'autre part, les systèmes "ouverts" sont des installations extérieures qui peuvent être divisées en deux catégories: les étangs naturels (lacs et lagunes) et les étangs artificiels ou les conteneurs (Posten et al., 2009). Les bassins ouverts tels que le Raceway(Figure 4), le réservoir d'étang circulaire et le grand étang peu profond, sont les plus couramment utilisés pour la culture de microalgues et pour la séquestration de CO₂ directement à partir de l'atmosphère ambiante (Parmar et al., 2011). En outre, les bassins circulaires (pivot central) sont les plus anciens étangs ouverts et ont été principalement utilisés pour la culture de *Chlorella* sp. à une grande échelle en particulier en Asie du Sud-Est (Lee et al., 2001). D'un point de vue économique, bien que la production de microalgues dans les systèmes "ouverts" est plus importante, les coûts de construction et d'exploitation sont réduits (Posten et al., 2009; Razzak et al., 2017). En revanche, ces systèmes sont plus sensibles à la diffusion de CO₂ dans l'atmosphère, aux pertes par évaporation de l'eau, aux contaminants et à la mauvaise utilisation de la lumière par les cellules (Posten et al., 2009).

1.4.2. Les paramètres de croissance

Il existe plusieurs paramètres et besoins régulant la croissance des microalgues . On pourra les diviser en facteurs biotiques ainsi que des facteurs abiotiques (Yadav et al., 2017). Les facteurs biotiques comprennent la présence d'agents pathogènes tels que les bactéries, les champignons, les virus et la compétition avec d'autres microalgues, tandis que les facteurs abiotiques comprennent l'intensité lumineuse (qualité et quantité), la température, le pH, la salinité, le CO₂ dissous et la présence de composés toxiques (Gonçalves et al., 2017). La

Chapitre I- Revue de littérature

Figure 5 présente un aperçu schématique des facteurs et des conditions affectant la croissance et la productivité de la biomasse des microalgues (Razzak et al., 2017).

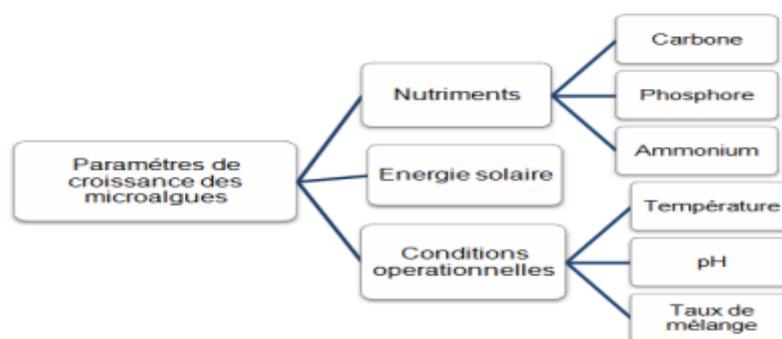


Figure 5 : diagramme des paramètres de croissance des microalgues.

1.4.2.1. Eclairage et intensité lumineuse

La croissance photoautotrophique des microalgues se fait en présence de lumière qui représente la source d'énergie utilisée pour convertir le carbone inorganique (CO₂) en carbone organique (Gonçalves et al., 2017). La qualité et la quantité de la période de lumière (photopériode) sont indispensables pour le processus de photosynthèse (Yadav et al., 2017). Plusieurs études tels que Posadas et al. (2013), ont montré une performance importante des systèmes de traitement des eaux basés sur le couplage de la biomasse algale en adoptant des cycles de lumière/obscurité de 16h/8h.

1.4.2.2. Conditions opérationnelles

➤ Température

La majorité des espèces de microalgues tolèrent des températures entre 16 et 27°C (60 et 80 F), avec un optimum de 24°. Une légère fluctuation ne cause pas de sérieux problèmes. Des températures inférieures ne sont pas létales pour les microalgues mais vont inhiber la croissance. Cependant des températures supérieures à 35°C (94F) tuent la majorité des microalgues (Hoff et al., 2001).

La température optimum peut varier avec la composition du milieu de culture, les espèces et les souches cultivées (Lavens et al., 1996).

La température optimale pour la croissance des microalgues est spécifique à l'espèce et varie dans la gamme de 15-30°C (Yadav et al., 2017).

Chapitre I- Revue de littérature

➤ SALINITE

La majorité des espèces croissent mieux à des salinités moins importantes que celles de leurs habitats natifs. Le phytoplancton marin est extrêmement tolérant aux conditions de salinité, de manière générale l'optimum de salinité pour toutes les microalgues est de 20 à 24 g/l (Lavens et al., 1996).

➤ TURBULENCE

L'homogénéisation de la culture est importante pour éviter la sédimentation des microalgues et pour permettre une alimentation en lumière et en nutriments pour optimiser l'échange gazeux entre le milieu de culture et l'air, et en fin pour assurer une bonne répartition de la température (Lavens et al., 1996).

1.4.2.3. Besoins en éléments nutritifs

Une bonne croissance des microalgues en culture dépend de l'apport en éléments nutritifs, les cultures algales doivent être enrichies en :

➤ Macronutriments incluant

la croissance des microalgues dépend d'autres nutriments, tels que l'azote et le phosphore ,Ces nutriments sont nécessaires à la synthèse des acides nucléiques et des protéines (Gonçalves et al., 2017). Leur présence à des concentrations limitées peut entraîner des taux de croissance réduits et des productivités faibles de biomasse (Gonçalves et al., 2017).

Les nitrates : comme source d'azote généralement apportée sous forme de nitrate de sodium (NaNO_3) ou de potassium (KNO_3). Elle est aussi assimilée sous forme d'azote uréique (NNH_4). Le phosphore : généralement employé sous forme de dihydrogénophosphate de sodium (NaH_2PO_4)

La silice : nécessaire uniquement pour les diatomées.

➤ Micronutriments incluant

-Microéléments inorganiques: ils sont employés sous forme de sels (chlorures ou sulfates) solubles, ces éléments précipitent ce qui implique l'apport d'un chélateur (Na_2EDTA). Les principaux métaux utilisés sont : le cobalt, le cuivre, le manganèse, le molybdène et le zinc.

-Micronutriments organiques: trois vitamines sont généralement employées la cyanocobalamine (B12), la thiamine (B1), la biotine (Audineau, 1986).

Chapitre I- Revue de littérature

➤ LE PH

L'intervalle de pH pour la plus part des cultures microalgale est entre 7 et 9 (Yen et al., 2014). avec un optimum situé entre 8,2 et 8,7 . les milieux acides (pH 5-7) sont favorables à la croissance des algues eucaryotes dans l'eau douce tandis que les milieux alcalins (pH 7-9) sont bénéfiques pour la croissance des cyanobactéries (algues bleuvert) (Razzak et al., 2013). La perturbation de la croissance cellulaire est souvent due à l'incapacité de maintenir un pH acceptable (Lavens et al., 1996).

➤ Réseau d'air et gaz carbonique (l'aération)

La première importance de l'air est la présence d'une source de carbone pour la photosynthèse sous forme de CO₂. Et le principal nutriment requis pour la croissance des microalgues autotrophes est le carbone inorganique puisqu'il est le précurseur des réactions photosynthétiques (Gonçalves et al., 2017).

L'air insufflé dans la culture contient 0.03% de CO₂, pour la culture dense, ce taux limite la croissance, car il est insuffisant (Lavens et al, 1996). L'apport en gaz carbonique (2 à 3 %) est indispensable pour obtenir des concentrations importantes, il permettra aussi le maintien du pH (mis en solution il va réagir avec l'eau pour donner de l'acide carbonique puis s'ioniser pour donner du bicarbonate qui stabilisera le pH. (Audineau, 1986).



1.4.3. Les conditions de culture (mode de nutrition)

Les microalgues peuvent se développer dans différentes conditions selon les sources d'énergie et de carbone utilisés. Le Tableau 1 rapporte une comparaison entre les conditions de la croissance des microalgues basées sur le type de source d'énergie et de carbone (Razzak et al., 2017).

TABLEAU1 : CONDUCTION DE CULTURE DES MICROALGUES

Conditions de culture	Source d'énergie	Source de carbone
Phototrophique	Lumière	Carbone inorganique
Heterotrophic	Carbone organique	Carbone organique
Photoheterotrophique	Lumière	Carbone organique
Mixotrophique	Lumière et carbone organique	Carbone organique et inorganique

Chapitre I- Revue de littérature

1.4.3.1. Culture photoautotrophie

La croissance des microalgues photoautotrophes se produit en présence de la lumière visible et du carbone inorganique dans le milieu de culture comme la seule source de carbone (Razzak et al., 2017).

Les organismes autotrophes élaborent leurs propres substances à partir des sources minérales. Les organismes photoautotrophes élaborent grâce à la photosynthèse leur propre substances à partir d'éléments minéraux dissous dans l'eau et du CO₂. Les photoautotrophes obligatoires sont ceux qui sont incapables de croître dans l'obscurité et beaucoup d'algues appartiennent à cette catégorie (Grobbelaar, 2004).

1.4.3.2. Culture hétérotrophe

Dans la culture hétérotrophe, les microalgues utilisent de la matière organique carbonée à la fois comme une source d'énergie et comme une source unique de carbone. Par conséquent, la lumière n'est plus nécessaire pour la croissance cellulaire (Huang et al., 2010) ce qui rend cette culture comme la moins chère. En culture hétérotrophe, la conception du réacteur et la mise à l'échelle pour le traitement des eaux sont relativement moins difficiles (Perez-Garcia et al., 2011).

Les organismes hétérotrophes utilisent des composés organiques dissouts (Droop, 1974) et particulaire par phagotrophie (Porter, 1988). Certaines microalgues peuvent croître exclusivement sur substrats organiques ce qui est très avantageux pour la production de biomasse et de certains composés dans des réacteurs clos (Grobbelaar, 2004).

1.4.3.3. Culture mixotrophique

Dans la culture mixotrophique, les microalgues peuvent se développer d'une manière autotrophie ou hétérotrophie en fonction de la disponibilité de la lumière et de la concentration en carbone (Mata et al., 2010).

(ou l'amphitrophie) est l'équivalent de l'autotrophie et de l'hétérotrophie quand le CO₂ et les composés organiques sont nécessaires à la croissance (Grobbelaar, 2004).

La figure 6 ci-dessous résume les différents modes nutritionnels chez les microalgues.

Chapitre I- Revue de littérature

D'autre part, plusieurs microalgues ont un métabolisme hétérotrophe de nutrition et celles-ci n'ont pas besoin d'énergie solaire. Elles utilisent plutôt une source de carbone organique pour la production de l'énergie et des composants organiques. Les microalgues de métabolisme mixotrophe peuvent se nourrir soit par autotrophie soit par hétérotrophie. En effet, en absence d'énergie lumineuse, lorsqu'une source de carbone organique est disponible, le développement des chloroplastes est inhibé et ces microalgues métabolisent leur énergie en mode hétérotrophe.

I.1.5.Mécanisme de photosynthèse des microalgues

sont des organismes photosynthétiques qui sont capables de capter la lumière via l'absorption des photons par les unités photosynthétiques (PSU) et de convertir cette énergie lumineuse en énergie chimique à travers leurs pigments principaux (chlorophylle(a), chlorophylle(b), le carotène et xanthophylle) (Yadav et al., 2017) la photosynthèse se produit en deux phases: la lumière et l'obscurité comme a été illustrée dans la Figure 7 suivante.

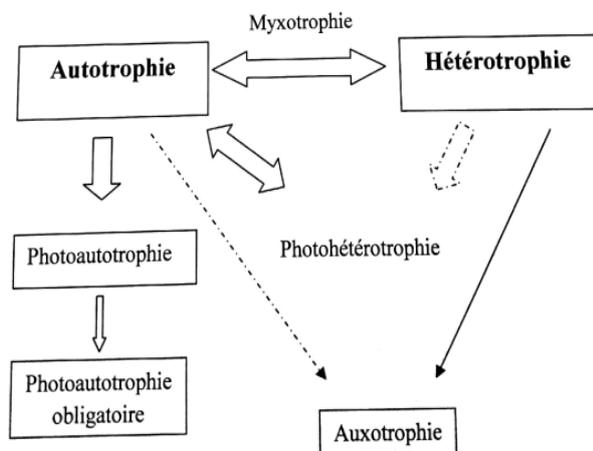


Figure 4 : mécanisme de photosynthèse chez Les microalgues .

Ainsi, lorsqu'il fait jour, les réactions dépendent de la lumière et sont principalement impliquées dans la synthèse de molécules riches en énergie telles que l'adénosine triphosphate (ATP) et le Nicotinamide adénine dinucléotide phosphate (NADPH) dans les thylakoïdes. L'équation globale pour les réactions dépendantes de la lumière est (Razzak et al., 2013): (Eq.4)



Chapitre I- Revue de littérature

D'autre part, la fixation du CO₂ se produit dans le stroma des chloroplastes pendant la phase sombre, où sont localisés toutes les enzymes et les intermédiaires du cycle de Calvin. Pendant cette réaction, le CO₂ provenant de l'atmosphère ou d'autres sources de gaz de combustion est converti en sucre à l'aide d'ATP par l'activité carboxylase de l'enzyme ribulose -1, 5- bisphosphate carboxylase (RuBP)/oxygénase (Rubisco). La réaction globale de la photosynthèse peut être décrite par une simple équation empirique (Zhao et al., 2014): (Eq. 5)



Le mode le plus commun d'absorption du carbone inorganique (Ci) par les cellules C₃ reinhardtii (un organisme modèle chez les microalgues) passe directement par l'absorption du Ci à travers la membrane plasmique et l'enveloppe de chloroplaste via un transporteur actif ou diffusion passive de CO₂ (Yadav et al., 2017).

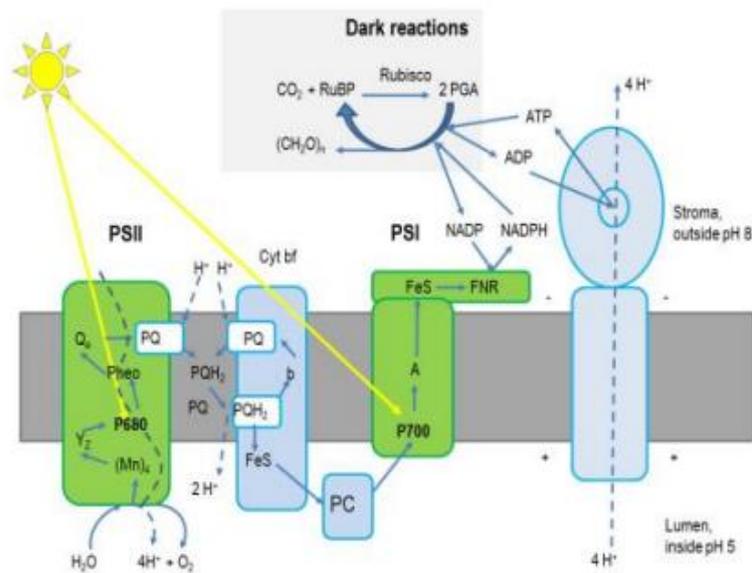


Figure 5 : diagramme de processus de la photosynthèse : réactions dépendante de la lumière et réactions sombres (cycle Calvin-Benson) (d'après Van Den Hende, 2014)

Chapitre I- Revue de littérature

I.1.6. Dynamique de croissance des microalgues

Comme beaucoup de microorganismes, la croissance de culture axénique de microalgues est caractérisée par quatre phases principales, cette croissance est représentée par une courbe de croissance.

1.6.1. Phase d'adaptation

Durant cette phase il n'y a pas d'augmentation de la densité cellulaire, elle est relativement longue lorsque les cultures sont transférées d'un milieu solide à une culture liquide. Les cultures inoculées avec des cellules en phase exponentielle de croissance ont une phase d'adaptation courte. Le retard de la croissance peut être attribué à une adaptation physiologique des cellules (préparation du bagage enzymatique impliqué dans la fixation du carbone est la division cellulaire. (Lavens et al., 1996, Yuan-Kun Lee et Hui Shen, 2004).

1.6.2. Phase exponentielle :

A la fin de la phase de latence, les cellules sont adaptées à l'environnement et à croître. Multiplier, (Yuan-Kun Lee et Hui Shen, 2004). Durant cette phase, la densité cellulaire commence à croître et est accélérée. (Yuan-Kun Lee et Hui Shen, 2004). Durant cette phase, la densité cellulaire augmente en fonction du temps selon cette fonction:

$$C = C_0 e^{Qt}$$

Avec :

- Q et C_0 la concentration des cellules à t et t_0 respectivement ;

1.6.3. Phase stationnaire

Les photons d'un flux lumineux traversent facilement une culture de faible concentration cellulaire, mais lorsque la culture présente une forte concentration, la majorité des photons seront capturés par les cellules, ces dernières continueront à croître jusqu'à ce que tout le flux empiétant la surface de la culture soit absorbé. Une fois cette concentration cellulaire atteinte, la biomasse s'accumule à un taux constant jusqu'à apparition d'un facteur limitant (épuisement du substrat, inhibition par les produits) c'est la phase stationnaire. (Richmond., 2004).

Chapitre I- Revue de littérature

La phase stationnaire peut être très courte si la densité cellulaire est trop élevée. (Lavens et al., 1996). La relation entre la densité du flux lumineux (I) et le taux de croissance spécifique est exprimée selon la formule de Monod (Gobel., 1978)

$$H = H_m I / (I + K_s)$$

H_m : taux de croissance maximum

K_s : constante, densité du flux lumineux correspondant au demi du taux de croissance maximum.

1.6.4. Phase de déclin

Durant cette phase, la qualité du milieu se détériore, le taux de nutriments est due réduit à un taux qui ne peut satisfaire l'exigence des cellules. La densité cellulaire décroît rapidement.

En pratique, le déclin peut être dû à une multitude de facteurs (Lavens et al, 1996).

Incluant :

- L'épuisement des nutriments.- Le manque d'oxygène.- La surchauffe de la culture.
- La variation de pH.- La contamination.

I.2. BIOREMEDIATION

la biorestauration est un processus biologique pour dégrader ou éliminer les contaminants environnementaux d'un site pollué, de l'eau, du sol et de l'air, en utilisant des organismes ou une activité biologique comme plantes, algues, bactéries, champignons et enzymes .Le principal avantage de la biorestauration par rapport aux processus physiques et chimiques est le coût. En général, il est inférieur aux processus physiques et chimiques, outre qu'il s'agit d'un processus qui ne produit pas plus de contaminants. Les inconvénients sont que le processus de biorestauration prend plus de temps que les processus physiques ou chimiques. La seconde est que le site à nettoyer doit avoir les bonnes conditions pour la croissance et le développement des organismes qui effectuent les processus d'élimination ou de dégradation des contaminants. La biorestauration comprend deux mécanismes pour diminuer les composés pollués, par dégradation impliquant la modification chimique des molécules, et l'élimination, qui est un processus de sorption des molécules polluantes. L'élimination des composés toxiques se fait par un processus de sorption, les composés sont

Chapitre I- Revue de littérature

absorbés par un substrat dans ce cas, un substrat biologique, de la biomasse ou des déchets agricoles qui peuvent être utilisés humides ou secs. La biodégradation implique un changement chimique de la molécule pour produire d'autres composés, généralement moins toxiques, et les organismes vivants ou leur système enzymatique sont responsables de la dégradation du composé. La biorestauration implique différents organismes. Lorsque les plantes sont responsables de l'assainissement, cela s'appelle la phytoremédiation. Ce processus est l'un des plus économiques, mais il prend plus de temps à être accompli. Les bactéries, les champignons et les algues peuvent également être responsables de la biorestauration ; l'efficacité dépend du type de composés, de la concentration initiale des composés toxiques, du site à nettoyer et du micro-organisme à utiliser. Dans de nombreux cas, une efficacité élevée est obtenue en utilisant un consortium microbien contenant une grande diversité de micro-organismes, y compris différents types de bactéries, de champignons et de micro-algues. Ce chapitre se concentre sur l'étude du rôle des champignons filamenteux dans les processus de biorestauration ; le rôle d'autres organismes, tels que les plantes, les bactéries et les algues, n'est pas abordé, mais il est important de savoir que la biorestauration pourrait également utiliser certains de ces organismes.

La biorestauration permet de contrôler la pollution de l'environnement et améliore la transformation ou la dégradation des produits chimiques toxiques pour devenir des formes environnementales moins nocives à l'aide de systèmes biologiques. Les algues pourraient être utilisées dans la biorestauration et le traitement des eaux usées pour diminuer la teneur en azote et en phosphore des déchets agricoles. Les technologies génétiques et la transgénèse et leurs rôles potentiels dans l'amélioration de l'utilisation potentielle des algues dans le traitement des eaux usées et la biorestauration ont été examinés et discutés dans ce chapitre. Les gènes marqueurs sélectionnables et les méthodes d'introduction d'ADN dans les cellules algales ont également montré leur potentiel (Handler et al. 2012).

I.3.1.DIFFERENTS SYSTEMES D'ALGUES UTILISES POUR LA BIOREMEDIATION

Les systèmes de culture pour la production de biomasse algale couplés avec l'assainissement de les eaux usées sont essentiellement des systèmes ouverts et des systèmes fermés (photobioréacteur). Autre que la culture en suspension, la culture attachée est également fréquemment mise en œuvre à la fois dans les systèmes ouverts et les systèmes fermés. Parmi ceux-ci, les algues à étang ouvert (étangs de raceway) la culture et les

Chapitre I- Revue de littérature

épurateurs de gazon sont les systèmes les plus populaires pour la culture des algues. Sur d'autre part, les systèmes fermés pour la culture des algues (photobioréacteurs) ont plus diversité basée sur ses formes et configurations du bioréacteur. Les systèmes fermés les plus fréquemment utilisés pour la culture des algues sont les tubes, les colonnes à bulles, le transport aérien, et écran plat Les algues utilisées dans ces systèmes peuvent agir en monoculture, en consortium ou en assemblage naturel de communauté d'algues. cependant, les deux autres modes sont considérés comme plus durables que le mode monoculture(Richardson et al. 2012)..

I.3.2.SYSTEMES DE CULTURE OUVERTS ET FERMES

➤ SYSTEMES "OUVERTS"

Les étangs ouverts pour la culture d'algues sont la forme de culture la plus ancienne et la plus simple systèmes de production de biomasse de microalgues (Handler et al. 2012). Ces systèmes ont d'abord été proposés par Oswald et al. (1953) en utilisant des étangs à microalgues à haut débit (HRAP), des bassins à palettes mixtes peu profonds et des Raceway complètement oxygénés (Craggs et al., 2013), où la symbiose algues-bactéries aboutie au traitement des eaux usées avec l'échange d'O₂ et de CO₂, et d'ions NH₄⁺ (Ramanan et al., 2016).

Dans la dernière décennie, des étangs de stabilisation ont été trouvés utilisés pour le traitement des eaux usées urbaines (Caldwell 1946).

En effet, l'avantage des étangs d'algues (HRAP) a augmenté l'efficacité du procédé avec un rendement fiable (Park et al.,2013). Les étangs de MaB-flocs présentent une performance économique de 0,25 à 0,50 €. m⁻³ d'eaux usées, similaire aux technologies conventionnelles de traitement des eaux usées (Vulsteke et al., 2017). Lors du traitement des eaux usées domestiques à l'aide d'un HRAP, ont rapporté des rendements d'élimination de NH₄-N et de PO₄-P d'environ 90% et 70%, respectivement (Park et Craggs, ,2011).

En général les étangs d'algues à haut débit (HRAP) sont un système de chemin de roulement ouvert de type peu profond avec un seul ou plusieurs boucles, et pour obtenir une vitesse de l'eau de 0,15 à 0,3 m / s, il utilise une palette roue (Park et al.2011) .La profondeur des systèmes est comprise entre 0,2 et 0,4 m (parfois jusqu'à 1 m) où le CO₂ peut être ajouté dans un puisard d'environ 1,5 m de profondeur. Il On constate que les étangs d'algues à haut

Chapitre I- Revue de littérature

débit réduisent la surface nécessaire par rapport aux étangs de stabilisation d'un facteur 5 (Picot et al. 1992) et atteindre un triple amélioration de la productivité de la biomasse avec un rendement de 10 tonnes / an / ha (Craggs et al. 2011). Par rapport aux systèmes à boues activées, les coûts d'investissement et les coûts d'exploitation sont considérablement réduits dans le cas des HRAP (Craggs et al. 2011).

Par contre en photobioréacteur, les microalgues peuvent être cultivées en conditions contrôlées, et il y a une augmentation significative de la productivité volumétrique par rapport aux systèmes ouverts de culture d'algues. Des recherches antérieures ont révélé que La culture de *Chlamydomonas reinhardtii* en utilisant les eaux usées dans un photobioréacteur a produit une meilleure biomasse et lipides (respectivement + 144% et + 271%), et élimination des taux de N et de P (+ 38% et + 15%, respectivement) ont été trouvés par rapport aux flacons la culture (Kong et al. 2010) Cependant, les systèmes de culture fermés demandent un coût nettement plus élevé que les systèmes ouverts de culture d'algues qui sont environ dix fois élevé (Davis et al. 2011)

➤ SYSTEMES "FERMES"

Plusieurs études ont proposé un traitement des eaux usées en utilisant les flocs-MaB dans des PBRs "fermés". Le Tableau I.3 (Gonçalves et al., 2017) illustre les différentes applications des consortiums symbiotiques algues-bactéries pour l'élimination de l'azote, carbone et phosphore à partir des eaux usées. Récemment, les réacteurs semi-continus SBR avec des flocs de microalgues-bactériens (flocs-MaB SBR) constituent une nouvelle approche pour le traitement photosynthétique des eaux usées à partir de la bio-floculation (Van Den Hende et al., 2014a, 2014b). Par conséquent, une nouvelle stratégie pour le traitement aérobie des effluents UASB de papeterie riches en calcium a été proposée dans un réacteur en SBR contenant des flocs-MaB, dans laquelle l'oxygène est fourni par photosynthèse et le calcium est éliminé par bio-minéralisation (Van Den Hende et al., 2017). Sur la base des résultats expérimentaux, le réacteur SBR supprimait $58 \pm 21\%$ de carbone organique, $27 \pm 8\%$ de carbone inorganique, $77 \pm 5\%$ d'azote, $73 \pm 2\%$ de phosphore et 27-11% de calcium (Van Den Hende et al., 2017). En outre, Rada-Ariza et al. (2017) ont comparé un réacteur à panneau plat (FPR1) contenant des consortiums de flocs-MaB et un réacteur à panneau plat à microalgues seulement (FPR2) pour l'élimination de l'ammonium des eaux usées artificielles. Les flocsMaB ont éliminé l'ammonium à des taux plus élevés ($100 \pm 18 \text{ mg NH}_4 + \text{-NL-1 .d-1}$) que les microalgues ($44 \pm 16 \text{ mg NH}_4 + \text{-NL-1 .d-1}$). Pour garder les cultures axéniques et

Chapitre I- Revue de littérature

devenir fragile souches qui produisent de puissantes molécules bioactives, les systèmes fermés sont très utile. Cependant, dans le cas d'un milieu d'eaux usées ayant une grande diversité de micro-organismes, ce précieux avantage est perdu en système fermé. De plus, le volume la productivité ne contrebalance pas le coût élevé du photobioréacteur pour le traitement des eaux usées urbaines ou agricoles pour la production d'algues. Pour la culture de micro-algues en culture attachée, les micro-algues immobilisées sont fixé sur un matériau de support, et qui est immergé dans le milieu nutritif. Cependant, il existe peu de comparaisons du traitement des eaux usées pour les systèmes d'algues attachées (Kesaano et Sims 2014).

Il a besoin de plus de recherches sur certains les facteurs qui affectent la croissance, le transport de la masse nutritive, la sélection des espèces, les interactions mutualistes algal bactériennes et l'intensification de la recherche en laboratoire. Le joint les systèmes de culture ont donné des résultats prometteurs avec certaines eaux usées. Il a été signalé que l'utilisation de fumier laitier pour la culture d'algues benthiques dans un le système de culture nécessiterait 26% de superficie en moins pour une absorption équivalente d'azote par rapport au processus de rotation conventionnel maïs / seigle (23% pour le phosphore) . De plus, le réacteur à disque rotatif à biofilm est l'un des système de culture attaché efficace pour la culture de microalgues utilisant les eaux usées avec une meilleure productivité de la biomasse (Wilkie et Mulbry 2002).

Des études antérieures révèlent que les productivités de la biomasse entre 20 et 31 g / m² / jour avec des taux de réduction des nutriments pouvant atteindre 14,1 g / m² / journée pour l'azote et 2,1 g / m² / jour pour le phosphore (Christenson et Sims 2012). En utilisant photobioréacteur à base de contacteurs biologiques rotatifs, une productivité moyenne de la biomasse de 20,1 ± 0,7 g / m² / jour a été obtenu sur une période de 21 semaines sans réinoculation Ces réacteurs offrent une meilleure surface au volume par rapport aux HRAP(Blanken et al. 2014).

I.3.3.le Rôle des algues dans la détoxification des polluants organiques et des métaux lourds

La présence à grande échelle de divers polluants toxiques comme les métaux lourds et d'autres contaminants dangereux dans l'environnement est une grave préoccupation aujourd'hui. Plusieurs méthodes d'élimination ont été proposées et mises en œuvre de manière respectueuse de l'environnement pour résoudre divers problèmes de pollution de

Chapitre I- Revue de littérature

l'environnement. Une étude récente de l'Oregon State University révèle que les plantes marines et les algues dans les écosystèmes côtiers peu profonds peuvent jouer un rôle majeur dans l'augmentation des effets de l'acidification des océans. De plus, les chercheurs ont découvert que les algues, les macroalgues vertes et leurs dérivés d'alginate montrent une affinité élevée pour divers ions métalliques (Mani et Kumar 2014). On sait que l'alginate joue un rôle important dans la biosorption des métaux par les algues brunes. Le potentiel des microalgues à bien fonctionner à de très faibles niveaux de contaminants sans produire de boues toxiques est facile à cultiver et à entretenir. De plus, les microalgues ont une très bonne affinité de liaison (en raison de leur surface spécifique relativement élevée et de leur charge négative nette) ainsi que des stratégies de remédiation appropriées (Suresh Kumar et al. 2015).

TABLEAU 2 : CONCENTRATION INITIAL(IN MG L⁻¹); %R -TAUX D'ELIMINATION; NH₄-N - AMMONIUM; TN - AZOTE TOTAL (MG N L⁻¹); PO₄-P - PHOSPHORUS (MG P L⁻¹); TP - PHOSPHORES TOTAL (MG PL⁻¹); TOC - CARBONE ORGANIQUE TOTAL (MG C L⁻¹); COD (MG O₂ L⁻¹); N.A: PAS D'APPLICATION.

Microorganismes	Nature des eaux usées	Mode opératoire	Temps (jours)	Azote		Phosphore		Carbone		Références
				C _i (mg/L)	%R	C _i (mg/L)	%R	C _i (mg/L)	%R	
<i>Chlorella vulgaris</i> + bactéries issues des eaux usées primaires	Eaux usées municipales	PBR fermé tubulaire Suspendu Batch	8-20	17-207 NH ₄ -N	30.9 100	1.4-19.6 TP	65-98	n.a n.a	n.a	He et al., 2013
Consortium de microalgues isolé d'un HRAP et de boues activées	Eaux usées synthétiques	PBR fermé Suspendu Continu	2-20	120 NH ₄ -N	75-96	n.a	n.a	200 TOC	86-90	Alcántara et al., 2015
<i>Chlorella vulgaris</i> + <i>Bacillus licheniformis</i>	Eaux usées synthétiques	PBRs fermé Suspendu Batch	6	20 NH ₄ -N	78	4 TP	92	n.a	n.a	Liang et al., 2013
Consortium de microalgues-bactéries isolé des eaux usées centrales	Eaux usées centrales	PBR tubulaires à biofilm "ouverts"	10	91 TN	70	7 PO ₄ -P	85	181 TOC	90	Posadas et al., 2013

Quelques études antérieures sur le potentiel des microalgues pour la biorestauration des métaux lourds sont notées dans le tableau 2

Chapitre I- Revue de littérature

I.3.4. Les mécanismes d'élimination des nutriments adoptés par les microalgues

Dans le but d'améliorer les processus d'assainissement des eaux usées en utilisant des microalgues, il est très important de comprendre les mécanismes impliqués dans l'élimination des nutriments. Le Tableau 3 résume les mécanismes adoptés dans l'élimination du carbone, de l'azote et du phosphore par les microalgues (Gonçalves et al., 2017). Tableau 3 . Mécanismes impliqués dans l'élimination des nutriments (carbone, ammonium, phosphore) par les microalgues (Gonçalves et al., 2017).

Les microalgues jouent un rôle important dans la fixation et l'assimilation de l'azote. Les micro-algues procaryotes notamment les cyanobactéries sont capables de fixer l'azote moléculaire atmosphérique (N₂-N) et de le convertir en azote ammoniacal (NH₃-N), qui peut être incorporé dans les acides aminés et les protéines ou être excrété dans l'environnement (Cai et al., 2013) selon l'équation suivante: (Eq. 6)



Les microalgues eucaryotes, à leur tour, sont capables d'assimiler l'azote fixé, tel que NH₄-N, NO₃-N et nitrite-azote (NO₂-N) (Gonçalves et al., 2017). Cependant, l'assimilation de cette source d'azote nécessite une réduction en NH₄-N, par un processus en deux étapes catalysées par les enzymes nitrate réductase et nitrite réductase (Crofcheck et al., 2012) (Eq. 7 et 8)



Puisque l'assimilation du NH₄-N ne nécessite pas des étapes de réduction on pense que c'est la forme préférée d'azote pour les microalgues. Par conséquent, en plus de l'absorption de microalgues, l'élimination du NH₄-N peut se produire en réponse à une augmentation du pH et de la température, où de grandes quantités de NH₄-N peuvent être volatilisées (Cai et al., 2013; Wang et al., 2014). L'élimination du PO₄-P peut également être influencée par les conditions environnementales, telles que le pH et la concentration d'oxygène dissous. Pour des valeurs de pH supérieures à 8,0 et des concentrations élevées en oxygène, une précipitation du phosphore peut se produire (Su et al., 2012; Cai et al., 2013). Ce nutriment pénètre dans les cellules de microalgues via un transport actif au niveau de la membrane

Chapitre I- Revue de littérature

plasmique sous forme de dihydrogène de phosphate ($H_2PO_4^-$) et de hydrogène de phosphate (HPO_4^{2-}).

I.3.5. LE ROLE DES CONSORTIUMS DE MICROALGUES DANS L'ELIMINATION DES POLLUANTS

Tableau 3: quelques études sur l'application d'algues pour la biorestauration des métaux lourds (Priyadarshani et al. 2011).

Nutriments	Mécanismes	Incorporation cellulaire
CO_2	Intégration du cycle de Calvin	Diffusion ($5 < pH < 7$) Transport actif ($pH > 7$)
Carbone organique	Intégration de la respiration	Diffusion-Transport actif
Ammonium NH_4-N	Conversion directe en acide-aminé Transport actif Stripping dû à la volatilisation (valeurs de pH élevées et températures)	Transport actif
Phosphore PO_4-P	Phosphorylation Précipitation chimique (pH élevé et oxygène dissous)	Transport actif

De nos jours, d'importants efforts de recherche sont orientés vers l'étude de la faisabilité économique des systèmes d'algues pour éliminer les composés d'azote et de phosphore issus des rejets d'eaux usées (Razzak et al., 2017). Wang et al. 2010a, 2010b ont étudié l'utilisation potentielle des algues vertes *Chlorella* sp. pour éliminer les nutriments des eaux usées. Au cours de cette étude, les pourcentages d'élimination de l'azote et du phosphore totaux étaient respectivement de 68,5% et 90,6%. D'autres investigations conduites par (Wang et Lan, 2011) ont trouvé que les taux d'élimination des composés azotés variaient de 78% à 99% selon le rapport N / P à l'aide d'une micro-algue *Neochloris oleoabundans* cultivée dans une eau usée municipale. Alors que les composés phosphoreux étaient complètement enlevés indépendamment du rapport N / P dans le milieu. En outre, un consortium mixotrophique de *Chlorella* sp. et *Scenedesmus* sp. a été efficacement appliqué dans l'élimination de l'azote et du phosphore d'une eau usée municipale par Koreivienė et al. (2014). Ces auteurs ont rapporté des taux d'élimination de l'azote total (TN) et du phosphore total (TP) comprises entre 88,6-96,4% et 99,7-99,9%, respectivement. Par conséquent, la combinaison entre la capture de CO_2 et l'élimination des nutriments (en particulier les composés d'azote et de phosphore) à

Chapitre I- Revue de littérature

partir des eaux usées, par l'utilisation des microalgues, représente une technologie verte assez développée (Wang et al., 2008).

I.3.6. Evolution des bactéries et des microalgues

L'évolution des écosystèmes terrestres et aquatiques est généralement attribuée à la contribution des archées, des bactéries, des cyanobactéries et ensuite des algues eucaryotes (Ramanan et al., 2016). Les micro-organismes hétérotrophes et phototrophes, caractérisés par une large diversité microbienne et une croissance rapide, sont les plus actifs à tous les niveaux du réseau trophique (Hamdi, 2016).

Il a été largement admis, selon Kawafune et ses collaborateurs (2014), que les bactéries hétérotrophes, associées aux algues dans la nature, ont joué un rôle majeur dans l'évolution d'algues vertes volvocines: unicellulaire (*Carteria cerasiformis*) et multicellulaire (*Pleodorina japonica*) à travers divers événements d'endosymbioses. (Kawafune 2014).

Chapitre II

Chapitre II Généralités sur les eaux usées

II.1 Définition des eaux usées

Les eaux usées correspondent aux eaux ayant été utilisées par les individus ou d'autres secteurs (industrie ou agriculture) (CHOCAT, 1997), elles résultent de la pollution tant physico-chimique que bactériologique des eaux de consommation de bonne qualité, du fait des activités humaines (RICHARD, 1996). Elles sont généralement chargées en matières minérale ou organique sous forme dissoutes ou en suspension (BOUZIANI, 2000).

Les eaux usées sont toutes les eaux parvenant dans le réseau d'assainissement dont les propriétés naturelles sont transformées. (BLIEFERT, 2001). La plus part des eaux usées sont offensives, d'autre sont pathogènes, elles peuvent être l'origine de grave problèmes de santé publique (BECIS, BELOUIDIANE, 2005)

II.2. Les caractéristiques des eaux usées

Les eaux usées contiennent des quantités significatives de nutriments propices à la croissance des algues. Les nutriments peuvent être classés dans les catégories suivantes: (i) source de carbone issue du CO₂, (ii) une source d'énergie provenant de la lumière, (iii) une source d'azote (par exemple de l'ammoniac, nitrates) des eaux usées ou d'autres milieux de culture, (iv) des minéraux provenant des milieux de culture et (v) des vitamines potentiellement ajoutées (Razzak et al., 2013).

Pour évaluer l'utilisation des microalgues dans le traitement des eaux usées, les rapports molaires azote / phosphore (N: P) influencent fortement la production de biomasse microalgale et donc l'absorption des nutriments (Gonçalves et al., 2017). Ainsi, les rapports molaires N: P inférieurs à 5: 1 entraînent une limitation de l'azote, alors que les rapports molaires N: P supérieurs à 30: 1 entraînent une limitation du phosphore (Larsdotter et al., 2006).

II.3. Traitement des eaux usées

L'utilisation du BGA dans le traitement des eaux usées est les activités les plus récentes des cyanobactéries, qui sont discutées ci-dessous.

La plupart du temps, le BGA est utilisé en combinaison avec procédé traditionnel de traitement des eaux usées.

Chapitre II Généralités sur les eaux usées

II.4.Composition des eaux usées et dangers connexes

II.4.1.Compositions biologiques

Les compositions biologiques et chimiques des eaux usées sont très bien connectées, car la plupart des eaux usées domestiques contiennent des organismes biologiquement actifs corps humain ou matériaux utilisés dans les ménages humains. Il existe principalement quatre types de composants biologiques majeurs des eaux usées, qui contiennent presque tous les micro-organismes pathogènes, tels que virus (hépatite, rotavirus), bactéries (Salmonella, Shigella, Campylobacter, Vibrio cholerae) et protozoaires (Entamoeba, Giardia). En dehors de cela, les eaux usées peuvent également contenir des parasites tels que les helminthes (Ascaris). Il existe plusieurs méthodes de traitement des eaux usées; les plus utilisés et acceptés sont les procédés conventionnels utilisant des désinfectants ou des procédés de traitement primaire / secondaire / tertiaire. Mais les récents développements de la chimie industrielle et des études écologiques ont également montré de nouvelles promesses dans les méthodes naturelles de traitement des eaux usées(Winfrey et Tilley 2016)..

II.4.2.Compositions chimiques

Selon les sources, les eaux usées peuvent contenir une large gamme de produits chimiques. La plupart des produits chimiques nocifs proviennent principalement de déchets industriels et commerciaux qui contiennent principalement des métaux lourds, dont le mercure, le plomb et le chrome, ainsi que des peintures et d'autres composés d'ammonium provenant des industries cosmétiques Certains déchets agricoles tels que l'urée, les médicaments, les hormones, les pesticides, les engrais et les composés azotés et soufrés primaires et secondaires sont également présents. En revanche, les matières fécales, les poils, la nourriture, les vomissures, les fibres de papier, les matières végétales, l'humus, etc. proviennent des déchets chimiques domestiques. Les eaux usées domestiques sont classées en deux classes différentes telles que les eaux grises et les eaux noires .Les eaux grises sont toutes les eaux usées qui sont générées dans des sources de bâtiments domestiques ou de bureaux sans contamination fécale. Par conséquent, par définition, les eaux grises ne comprennent pas le rejet des toilettes ou des eaux usées hautement contaminées par les matières fécales, qui sont désignées comme eaux usées ou eaux noires et contiennent des déchets humains. La plupart du temps, les contaminants chimiques proviennent de composés azotés, principalement des nitrates. Les principaux problèmes sont liés à la conversion du

Chapitre II Généralités sur les eaux usées

nitrate en nitrite dans le système digestif, ce qui peut entraîner de graves problèmes en raison de son taux d'absorption élevé dans le sang, où il se lie à l'hémoglobine et forme la méthémoglobine et éventuellement bloque la liaison de l'oxygène créant une pénurie d'oxygène en sang (Winfrey et Tilley 2016).

II.5.Métaux lourds

Les métaux lourds se trouvent dans les eaux usées urbaines à l'état de trace. Les eaux usées contiennent parfois une concentration élevée de différents métaux lourds, comme par exemple le zinc (Zn), le chrome (Cr), le nickel (Ni), le cadmium (Cd), le plomb (Pb), le cuivre (Cu), etc. . La présence excessive de métaux lourds est hautement toxique pour la vie aquatique (El-Enany et Issa 2000). Ce qui entraîne différents risques pour la santé (El-Enany et Issa 2000). Ils ne sont pas dégradés par les processus de traitement des eaux usées. Un système à base d'algues pour l'élimination des métaux lourds est également développé par de nombreux scientifiques (Mehta et Gaur 2005; Romera et al. 2007)

II.6.MICROALGUES POTENTIELLES POUR LE TRAITEMENT DES EAUX USEES

Le traitement biologique avec des microalgues est un processus fascinant car elles peuvent absorber les nutriments (polluants) des eaux usées pour produire leur propre nourriture (de la Noue et De Pauw 1988). Cette méthode attrayante a été lancée en 1957 par Oswald et Gotaas (1957). Depuis lors, de nombreux laboratoires participent à des études pilotes et plusieurs STP utilisent différentes versions de ce processus (Shi et al. 2007; Zhu et Liu 2008). Les États-Unis, le Mexique, l'Australie, la Thaïlande et Taïwan s'intéressent beaucoup au traitement des eaux usées par les algues (Borowitzka et Borowitzka 1988; Wang et al.2008). En Inde, de nombreux scientifiques participent également à la biorestauration des eaux usées à l'aide d'algues (Sivasubramanian 2006; Sengar et Al. 2011; Mahapatra et al. 2014). Les microalgues offrent une approche rentable et respectueuse de l'environnement pour éliminer les polluants des eaux usées (Grobbelaar 2004).

II.7.Paramètres essentiels pour le choix d'une technologie de traitement des eaux Usées

Les paramètres essentiels qui doivent être pris en compte pour le choix d'une technologie de traitement doivent tenir compte :

- Des exigences du milieu récepteur.

Chapitre II Généralités sur les eaux usées

- Des caractéristiques des eaux usées, (demande biochimique en oxygène, demande chimique en oxygène, matières en suspension...etc.).
- Des conditions climatiques (température, évaporation, vent, etc.).
- De la disponibilité du site.
- Des conditions économiques (coût de réalisation et d'exploitation).
- Des facilités d'exploitations, de gestion et d'entretien (BEKKOUCHE et ZIDANE ,2004).

II.8.1.Traitements des métaux lourds

Dans les situations actuelles des industries minières et de traitement des minéraux où une quantité excessive de métaux et de produits chimiques est utilisée pour des opérations extra-métallurgiques, cela soulève des inquiétudes car cela entraîne la production et le rejet d'une grande quantité d'effluents aqueux à forte teneur en métal, ce qui a un effet drastique sur les environs plans d'eau (Vijayakumar 2012).

La principale préoccupation de cette époque est d'éliminer ces composés métalliques toxiques des effluents à une limite acceptable en utilisant des procédés rentables et respectueux de l'environnement. Les minuscules cyanobactéries ont une capacité d'absorption des métaux très élevée avec un taux de doublement élevé. Ces caractères des cyanobactéries ont encouragé leurs usages de la biomasse dans la détoxification des effluents. De plus, comme les cyanobactéries sont des organismes photosynthétiques, elles sont donc plus efficaces pour éliminer les métaux lourds et détoxifier les effluents. Le pH intérieur de la cellule cyanobactérienne est plus élevé (environ de deux unités) que le liquide environnant, il résiste donc au transfert de produit du biofilm. Des études récentes ont révélé que les cyanobactéries immobilisées dans la matrice sont plus puissantes pour éliminer les métaux lourds que les cyanobactéries libres. Voici quelques exemples:

1. Une absorption accrue de Cu et Fe de 45% et 23% observée chez *Anabaena* immobilisé par rapport à son homologue libre.
2. Une autre espèce d'*Anabaena* A. *Doliolum* a montré une élimination de 15 à 20% et 10 à 30 inférieure de Cr et Ni par les cellules vivantes par rapport à celle des cellules immobilisées.

Le mécanisme d'élimination des métaux est un processus complexe qui se produit principalement en deux phases distinctes: dans la phase I, les cations (ions chargés

Chapitre II Généralités sur les eaux usées

positivement) se lie très rapidement aux groupes chargés négativement de la paroi cellulaire des cyanobactéries, ce qui crée un masquage chargé négativement de la paroi cellulaire. Cela favorise la deuxième phase, où les ions métalliques sont absorbés en fonction des besoins métaboliques et des conditions de les cellules (Pabbi, 2015).

Un fait intrigant a également été proposé que cette propriété d'absorption de métal élevée des cellules immobilisées sur les cellules vivant librement augmente en fait la productivité énergétique photosynthétique. Cela est peut-être dû au pompage élevé des cations dans les cellules immobilisées, ce qui crée un déséquilibre H^+ dans la cellule. Ce déséquilibre augmente également les niveaux de H^+ dans les chloroplastes et les mitochondries qui sont ensuite utilisés pour la production d'ATP tout en pompant les protons pour maintenir l'homéostasie. Cependant, la forte propriété d'absorption des métaux des cellules immobilisées peut également être due à une perméabilité accrue de la paroi cellulaire (Khummongkol et al. 1982)

La décontamination la plus efficace des métaux lourds dépend fortement des conditions environnementales et dépend principalement du pH et de la température. Certaines algues telles que *Chlorella*, *Scenedesmus* et *Hydrodictyon* peuvent éliminer jusqu'à 90% des métaux lourds des eaux usées. Des études récentes ont montré que *Phormidium ambiguum* (Cyanobacterium), *Pseudochlorococcum typicum* et *Scenedesmus quadricauda* var *quadrispina* (Chlorophyta) ont une capacité élevée d'élimination du mercure et du cadmium (Shanab et al. 2012). Une autre étude a montré la biosorption de différents métaux lourds toxiques tels que le Pb, le Cd, le Co, le Ni, le Zn et le Cu par l'exopolysaccharide (EPS) produit par *Paenibacillus jamilae* (Pérez et al. 2008). Une autre étude a montré que les rhizobiums ont un rôle important dans les polysaccharides extracellulaires et la formation de biofilms (Nocelli et al. 2016). Une étude sur *Spirulina platensis* a montré une absorption significative de chrome (Cr^{3+}) sous forme libre plutôt que sous forme embayée. Ces études, y compris d'autres propriétés de biorémediation, donnent de nouvelles promesses pour l'utilisation du BGA dans les usines de traitement des eaux usées traditionnelles afin de réduire la rentabilité et de meilleurs résultats, et des expériences à grande échelle ont également été lancées aux États-Unis et au Canada (Shashirekha et al. 2008).

II.8.2.L'épuration des eaux usées par les microalgues

Les microalgues sont utilisées depuis des décennies pour le traitement des eaux usées dans le cadre du lagunage. L'optique actuelle est de dépolluer en transformant les déchets en

Chapitre II Généralités sur les eaux usées

produits valorisables, comme les biocarburants ou la biomasse pour produire du biogaz. Cette optique est importante pour les usines de traitement des eaux usées, car elle réduit l'utilisation de produits chimiques. Cela se traduit par des économies d'énergie (Clarens et al. 2010).

L'utilisation des eaux usées dans la culture des microalgues est limitée par les caractéristiques de l'eau puisque pas toutes les espèces d'algues peuvent survivre avec une grande concentration des nutriments ou la présence d'autres substances (par exemple, des acides organiques, des composés phénoliques, etc.), par exemple, des concentrations élevées de médicaments, les désinfectants et les bactéries peuvent inhiber la croissance des microalgues (FAO, 2009).

En général, les eaux usées peuvent être classées en fonction de leur source en domestique ou industrielle. Les eaux usées domestiques comprennent toutes les eaux provenant des ménages. Ils contiennent les glucides, les graisses, les savons, les détergents, les protéines et leurs produits de décomposition (FAO, 1992). Leur teneur en urée est une source intéressante de l'azote sous forme d'ammoniac, Il a été prouvé que l'urée est un nutriment attractif pour *Spirulina platensis*, *Chlorella pyrenoidosa* et *Chlamydomonas Snowiae* (Danesi et al. 2002 ; Lin et al 2007 ; Richmond, 2007). Cependant, il a été observé que les algues ont certaines tolérances à l'ammoniac. *Chlorella pyrenoidosa* et *Chlamydomonas Snowiae* ont résisté à des concentrations d'ammoniac aussi élevées que 135 mg.L-1 alors que d'autres espèces comme *Scenedesmus obliquus* sont inhibées à des concentrations d'ammoniac supérieures à 34 mg.L-1 (Lin et al. 2007).

De plus, la composition des eaux usées industrielles peut être variable d'une production à l'autre (production de métaux, industrie agroalimentaire, pharmaceutique etc.), ce qui rend difficile l'utilisation d'un procédé standardisé. Le traitement de l'eau usée par l'algue se fait en général dans des bassins (Raceway ponds) de stabilisation dans la phase tertiaire. La profondeur du bassin varie de 1 à 6 m utilisé pour l'élimination des matières organique. Le temps de séjour d'eau dans le bassin varie entre 4 à 10 jour dans des HRAP (High rate algal ponds) au contraire au bassin conventionnel où le temps de séjour peut varier entre 20 à 100 jours (Ferrel and Sarisky-Reed, 2010).

Des exemples d'algues utilisés dans les bassins de stabilisation sont le *Chlorella Sp.* *Scenedesmus*, *Micractinium sp.* Et *Chlamydomonas* (Richmond, 2007).

Chapitre II Généralités sur les eaux usées

Il semblait donc économiquement plus intéressant d'utiliser ces microorganismes en traitement secondaire plutôt que tertiaire (Tam et Wong, 1989).

Les eaux usées provenant de l'industrie gazière et pétrolière présentent des compositions très variables selon la nature du procédé. Celles-ci contiennent généralement de grandes quantités de :

- Matières organiques dissoutes (benzène, toluène, éthylbenzène, xylènes, phénols et acides organiques) Matières organiques en suspension (ex.: hydrocarbures, huiles et graisses);
- Matières inorganiques dissoutes (ex.: métaux lourds, sulfates, nitrites et nitrates);
- Sels dissous (ex.: chlorures et bromures) (MDDEFP, 2012)

Les microalgues ont tout de même fait leurs preuves dans le traitement de composés dangereux, tels les phénols, les hydrocarbures et les autres composés aromatiques retrouvés dans ce type d'eaux. Cependant, leur efficacité n'a été démontrée jusqu'ici qu'en laboratoire. Les microalgues cultivées dans les eaux usées peuvent être aussi utilisées pour d'autres applications (MDDEFP, 2012).

9.2.1. Procédés d'épurations des eaux usées

-différents procédés peuvent être mis en œuvre

➤ **Prétraitement**

Les dispositifs de prétraitement physique sont présents dans toutes les stations d'épuration, quels que soient les procédés mis en œuvre à l'aval. Ils ont pour but d'éliminer les éléments solides ou les particulaires les plus grossiers (LADJEL, 2006). Il comporte 3 parties principales :

➤ **DEGRILLAGE :**

Il consiste à faire passer l'effluent entre les barreaux d'une grille, dont l'écartement se mesure habituellement en centimètres (BECHAC et al. 1983).

Le dégrillage a pour objectif :L'élimination des déchets volumineux.

Et La protection de la station de traitement (DEGRMONT, 2005).

➤ Dessablage :

Cette opération est indispensable pour éviter le colmatage des canalisations, surtout si elles sont enterrées et protéger les équipements à pièces tournantes de la Corrosion (axe de chaînes, rotors de centrifugeuse, pompes de relèvement, etc.) (MOUHAMMED OULI, 2001).

➤ Déshuilage dégraissage :

Les opérations de dégraissage et de déshuilage consistent en une séparation de l'effluent brut, les huiles et les graisses étant des produits de densité légèrement inférieure à l'eau (LADJEL, 2006).

9.2.1.1. Traitement primaire (traitement physico-chimique)

Le traitement primaire consiste principalement à séparer les matières organiques et inorganiques dissoutes / colloïdales principalement par filtration, sédimentation, séparation de phases ou flottation. Précédemment le traitement primaire n'a été envisagé que pour le traitement des eaux usées domestiques. Les suspensions colloïdales de métaux fins et de matières organiques sont principalement éliminées par filtration à travers des filtres dont la taille des pores est inférieure à celle des particules. Les particules de taille supérieure aux colloïdes sont principalement éliminées par séparation gravitaire. Les substances organiques non polaires sont également séparées par sédimentation. Les conteneurs comme le séparateur huile-eau API sont spécialement conçus pour séparer les liquides non polaires (Weber 2004). La séparation de phases est principalement utilisée pour éliminer les huiles et les graisses en passant par une phase non aqueuse. Parfois, les huiles sont saponifiées puis séparées par phases. Parfois, l'échange d'ions et l'osmose en phase inverse sont également utilisés pour séparer les substances non polaires. L'effluent issu du traitement primaire est appelé effluent primaire. Bien que le traitement primaire n'implique généralement aucun traitement chimique, récemment, il a été observé que les plantes utilisent des produits chimiques pour coaguler les matériaux colloïdaux (Grandclément et al. 2017).

Selon ce traitement primaire est classé en deux types.

➤ **Décantation :**

La décantation est la méthode la plus fréquente de séparation de MES et des colloïdes, un procédé qu'on utilise dans, pratiquement, toutes les usines d'épuration et de traitement des eaux. Son objectif est d'éliminer les particules dont la densité est supérieure à celle de l'eau par gravité. La vitesse de décantation est en fonction de la vitesse de chute des particules, qui elle-même est en fonction de divers autres paramètres parmi lesquels : grosseur et densité des particules (OUALI, 2001).

➤ **Coagulation-floculation**

La turbidité et la couleur d'une eau sont principalement causées par des particules très petites, dites particules colloïdales. Pour éliminer ces particules, on a recours aux procédés de coagulation et de floculation : la coagulation a pour but principal de déstabiliser les particules en suspension. La floculation a pour l'objectif de favoriser, à l'aide d'un mélange lent, les contacts, entre les particules déstabilisées (LADJEL, 2006).

➤ **Filtration :**

La filtration est un procédé de séparation dans lequel on fait percoler un mélange solide-liquide à travers un milieu poreux (filtre) qui idéalement retient les particules solides et laisse passer le liquide (filtrat) (DEGREMONT, 2005).

9.2.1.2. Traitement secondaire (épuration biologique)

Les techniques d'épuration biologiques utilisent l'activité des bactéries dans l'eau, qui dégradent la matière organique. Ces techniques peuvent être anaérobies, c'est-à-dire se déroulant en absence d'oxygène, ou aérobies c'est-à-dire nécessitant un apport oxygène. Le motif du traitement secondaire est d'éliminer les substances organiques et inorganiques solubles principalement par oxydation chimique et biologique-chimique ; cela peut aider à éliminer les matières organiques et inorganiques persistantes, principalement des composés de soufre et de phosphore. Parfois, l'oxydation chimique est effectuée en ajoutant de l'ozone ou du chlore pour éliminer les contaminants biologiques (virus et bactéries). L'oxydation chimique est largement utilisée pour la désinfection. L'oxydation biologique est principalement utilisée pour les déchets agricoles et dans les traitements des eaux usées

Chapitre II Généralités sur les eaux usées

principalement en utilisant divers micro-organismes dans des environnements contrôlés. Plusieurs micro-organismes aérobies sont utilisés pour décomposer les matières organiques et certains composés inorganiques au moyen de la photosynthèse anoxygénique. La plupart du temps, l'oxydation biologique à haut débit se fait dans un volume très faible sous un environnement bien contrôlé qui aide les micro-organismes à se développer. En cas d'oxydation biologique des matières organiques, il est nécessaire d'éliminer les microorganismes des eaux usées par sédimentation pour obtenir un effluent secondaire. Ce réservoir de sédiments fonctionne exactement comme la chambre de traitement primaire. Suivi par une sédimentation secondaire des micro-organismes, ces déchets biologiquement dégradés sont appelés boues biologiques. Les processus courants à haut débit impliquent le traitement des boues activées, le biofiltre ou le filtre ruisselant, les contacteurs biologiques rotatifs (RBC) ou les filtres de fossé. Surtout en cas de déchets municipaux, le traitement des boues activées est utilisé en combinaison avec des filtres ruisselants pour améliorer la DBO. Parmi les traitements biologiques, on distingue les procédés biologiques extensifs et les procédés biologiques intensifs (BENZAOUÏ et ELBOUS, 2009).

➤ **Procédés biologiques intensifs :**

Ce sont des techniques d'épuration classiques qui occupent peu d'espace . En plus, ils ont un coût d'installation et de fonctionnement élevé. les systèmes de traitement sont faitent par boues activées, lits bactériens, disques biologiques etc. (EDELIN, 1980).

➤ **PROCEDES BIOLOGIQUES EXTENSIFS :**

Il consiste sur les phénomènes de l'autoépuration naturelle et ils demandent une faible énergie, par contre, de grandes superficies et de longs séjours des eaux usées. et ils sont moins coûteux. Ce sont le lagunage, l'épandage, etc. (EDELIN, 1980).

9.2.1.3. Traitements tertiaires

Le traitement tertiaire et / ou avancé des eaux usées est utilisé lorsque des composants spécifiques des eaux usées ne peuvent pas être éliminés par un traitement secondaire. Pour le tertiaire traitement, des procédés de traitement individuels sont nécessaires pour éliminer le phosphore, l'azote, les métaux lourds supplémentaires, les solides en suspension, les solides dissous et les déchets organiques réfractaires. Ce traitement avancé suit généralement un

Chapitre II Généralités sur les eaux usées

traitement secondaire de haut niveau et est donc parfois appelé traitement tertiaire. Cependant, les processus de traitement avancés peuvent parfois être combinés avec un traitement primaire ou secondaire (par exemple, ajout de produits chimiques aux clarificateurs primaires ou bassins d'aération pour éliminer le phosphore) ou utilisés à la place d'un traitement secondaire (par exemple, traitement par écoulement terrestre des effluents primaires) (Grandclément et al. 2017).

On leur fait appel lorsqu'il est nécessaire d'assurer une protection complémentaire de milieu récepteur ou en raison d'une réutilisation immédiate.

Ces procédés ont notamment pour but :

- L'élimination de l'azote et du phosphore.
- La désinfection.

II.9.3. Les microalgues comme indicateurs de la qualité de l'eau

Les bioindicateurs sont constitués de micro-organismes ou de processus biologiques. Les bioindicateurs évaluent l'effet cumulatif de divers polluants sur la qualité de l'eau et comment elle se modifie avec le temps et à quelle période de temps elle peut prévaloir. Cependant, il existe une gamme d'organismes indicateurs, mais les algues sont des indicateurs potentiels pour évaluer la qualité de l'eau pour les raisons suivantes:

- Disponibilité facile des nutriments nécessaires à la croissance.
- Taux de croissance plus rapide.
- Cycle de vie plus court.
- Répartition géographique plus large.
- Disponibilité en masse de divers groupes.
- Réponse rapide aux changements qualitatifs et quantitatifs de l'environnement dus à la pollution.
- Détection et échantillonnage plus faciles (Gökçe 2016).

Les algues se sont révélées être des indicateurs appropriés de la qualité de l'eau. Les microalgues sont des bioindicateurs essentiels et probables de l'eutrophisation en raison de leur réponse immédiate aux variations des conditions environnementales résultant des différentes activités anthropiques (Kelly Gerreyn et al. 2004; Álvarez-Góngora et

Chapitre II Généralités sur les eaux usées

HerreraSilveira 2006; Livingston 2001) . Les microalgues se développent dans presque tous les habitats aquatiques en plus de demeurer sur des roches, des macroalgues ou des surfaces submergées, où des assemblages planctoniques et microphytobenthiques sont utilisés pour caractériser les écosystèmes aquatiques à l'aide d'outils biologiques, physicochimiques ou hydromorphologiques indicateurs (Hermosilla Gomez 2009). Diverses espèces de microalgues comme *Oscillatoria*, *Chlamydomonas*, *Scenedesmus* et *Chlorella* sont utilisées comme indicateurs de la pollution de l'eau (Padisák et al. 2006).

PARTIE

PRATIQUE

Chapitre I

Chapitre I-La région d'études

I-1.Présentation des zones humides

Les zones humides du bas-Sahara sont réparties en en trois zones :

- Cuvette Ouargla englobe les zones humides suivantes : (sebkha Oum Raneb, sebkha Safioune, chott Ain Beida, chott Baghdâd et les lacs hassi Ben Abdallâh).
- Oued righ (sud et nord).
- Les chotts (Merouane et Melghir).

Ces zones sont des écosystèmes aquatiques au Sahara septentrional algérien, classées sur la liste de la convention de Ramsar des zones humides, d'importance internationale, remplissant plusieurs fonctions. : Ces milieux humides servent comme exutoires aux eaux de drainage des palmeraies, d'écoulements de surface ou souterrain d'Oued M'ya ainsi qu'aux rejets d'eau usée. Ces actions anthropiques influent directement sur l'état quantitatif et qualitatif de ces surfaces d'eau.

Notre étude est faite au cours des lacs de la wilaya d Ouargla :

1.1. LACS D'OUARGLA

La cuvette d'Ouargla correspond à une grande dépression d'une superficie de 750 Km² environ. Elle est située dans le lit de la basse vallée fossile de l'oued M'ya qui prend origine du plateau de Tademaït (région d'In Salah, Tamanrasset) au Sud jusqu'à Sebkha Safioune de 40 kms au Nord de la ville d'Ouargla. L'Oued M'ya converge avec Oued Igharghar venant d'une source très loin au sud (Ahaggar) pour constituer la vallée de l'Oued Righ qui aboutit au Chott Melrhir (Ballais, 2010).

Dans la région d'Ouargla, la largeur de l'Oued Mya varie entre 4 à 30 km. La pente moyenne de la vallée est très faible (1‰), à partir de la ville d'Ouargla jusqu'à sebkha Safioune.

Cette zone renferme beaucoup des zones humides dont les principaux sont :

- Chott Ain Beida.
- Sebkha Oum Ranab.
- Lacs Hassi Ben Abdallah.
- Sebkha Safioune.

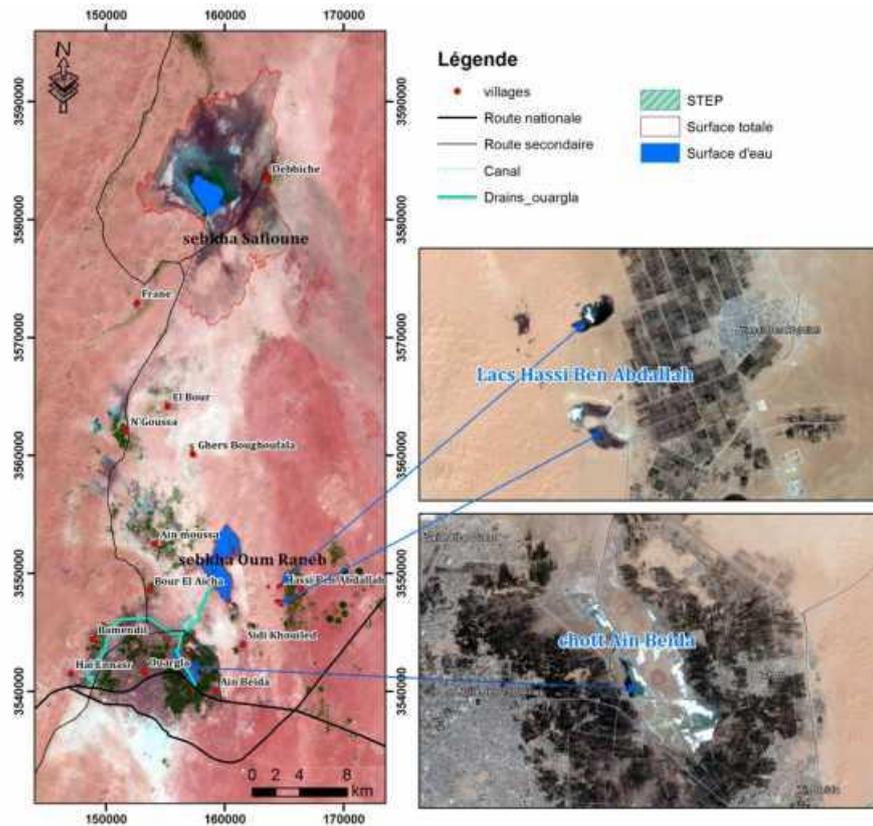


Figure 8 : zones humides de la cuvette d'Ouargla

➤ **Sebkha Oum Raneb**

C'est une zone humide d'une surface totale d'ordre (1085.99ha), située loin de 12km à la ville d'Ouargla. Elle est même classée comme zone humide d'importance internationale par la convention de Ramsar (Costa et al. 1996). Cette convention est un traité intergouvernemental qui sert de cadre à l'action nationale et à la coopération internationale pour la conservation et l'utilisation rationnelle des zones humides et de leurs ressources. La sebkha Oum Raneb est entourée par des formations dunaires au Nord, à l'Est et au Sud.

Elle est alimentée par les eaux usées de la ville d'Ouargla et les eaux de drainage agricole.

Chapitre I-La région d'études

➤ Chott Ain Beida

La région d'Ouargla recèle d'importants biotopes humides tels que le chott d'Ain El-Beida qui est classé comme une zone humide d'importance internationale selon la convention de Ramsar.

Le chott d'Ain El-Beida est une dépression saline d'une surface totale de (442.63ha), située au milieu des palmeraies de la cuvette d'Ouargla (loin de 5 km). Il est compris entre la palmeraie d'Ouargla à l'Ouest et au Sud, et la palmeraie d'Ain El-Beida à l'Est.

Allongé en direction Nord - ouest, Sud - est sur une longueur de 5,3 Km, sa largeur varie de 1 à 1,5 km.

➤ Les lacs Hassi Ben Abdallâh

Ils ont une superficie de 39.8ha, avec une surface d'eau de 9.79ha, et une profondeur maximale de 4.7 m, ils sont loin de 15 km à Ouargla et 2 km à la ville de Hassi Ben Abdallâh. Situés au fond de creux à l'ouest de la commune (32 " 01' N. et 5" 44' E.). Et bordés par des dunes de sable au Nord (Ergs), au Sud et à l'Est par la route national N56.

1.2. Canal d'Oued Righ

La vallée de l'Oued Righ est une entité économique bien précise qui regroupe près de 50 oasis situées au Nord- Est du Sahara du grand erg oriental et au Sud du Massif des Aurès. Elle s'étend sur un axe Nord-Sud d'environ 150 Km entre les latitudes Nord 32°54' et 34°9' et couvre 15000ha environ des palmeraies ; la vallée de l'Oued Righ plus souvent nommée simplement Oued Righ débute au Nord à Oum El Tiour à plus de 500 Km au Sud D'Alger et à 330 Km au sud de Constantine et elle se termine à 150 Km au Sud de la palmeraie d'El Goug. Elle est divisée souvent en Oued Righ nord et sud. Cette zone est la plus riche des zones humides dans le Sahara algérien.

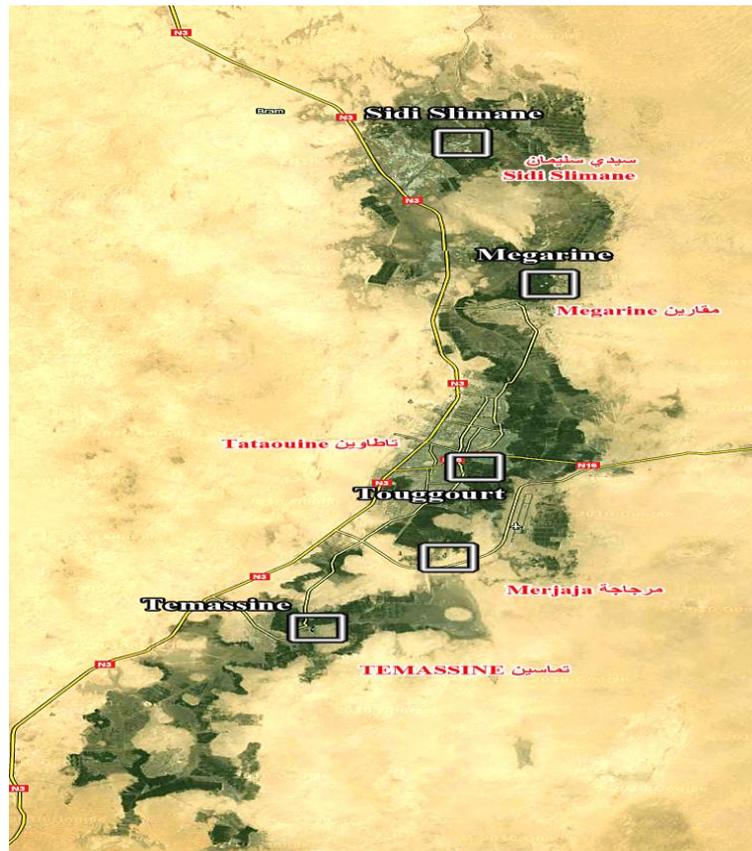


Figure 1 : Haut de L'Oued Righ (Région de Touggourt).

➤ Climatologie

De sens large, le Sahara algérien est caractérisée par des périodes de sécheresse prolongées, il Correspond à un désert zonal dans la typologie des zones désertiques (FAURIE et al, 1980).

Le climat de la vallée de l'Oued Righ est un climat désertique, caractérisé par des Précipitations faibles et irrégulières, des températures accusant des amplitudes journalières et annuelles importantes, par une faible humidité de l'aire ainsi que des vents de sable parfois très violents.

Chapitre I-La région d'études

➤ Etude des paramètres climatiques

Pour déterminer les caractéristiques climatiques de la région, une synthèse des données Climatiques de 39 ans (de 1974 à 2013) sur différents paramètres du climat, tels que les Précipitations, les températures et l'évapotranspiration acquises de l'office national de météorologie (ONM) au niveau de deux stations (Ouargla et Touggourt) dont les coordonnées sont dans le tableau :

Tableau 4: coordonnées des deux stations météorologiques

<i>Station</i>	<i>Ouargla</i>	<i>Touggourt</i>
<i>Latitude</i>	33,93°N	33,11°N
<i>Longitude</i>	5,4°E	06,13°E
<i>Altitude</i>	141m	85m

1.2.1. Haut de L'Oued Righ (Région de Touggourt)

- Canal de l'Oued Righ
- Lac de Temacine (Elbhour)
- Lac de Merjaja
- Lac de Tataouine
- Lac de Meggarine
- Lac de Sidi Slimane



Figure 2 : lac de Meggarine .



Figure 11 : lac de Merjaja

Chapitre I-La région d'études



Figure 12 : lac de Temacine

Tableau 5: la situation de haut de l'oued righ (Région de Touggourt).

	Latitude	Longitude	Altitude	Superficie	Profondeur	Bioclimat	Situation administrative
Lac de Temacine (Elbhour)	33° 00'46" N	006° 01' 24" E	70 m	~1.5	2-4 m	Arid	Commune de Temassine
Lac de Merjaja	33° 03'08" N	006° 03' 55" E	64 m	~1.2 ha	2-4 m	Arid	Commune de Nezla
Lac de Tataouine	33° 05'48" N	006° 04' 21" E	61 m	~ 0.2 ha	0.5-1 m	Arid	Commune de Nezla
Lac de Meggarine	33° 12'24" N	006° 05' 53" E	+ 51 m	1.8 ha	2-4 m	Arid	Commune de Megarine
Lac de Sidi Slimane	33° 17' 13" N	006° 05' 03" E	+ 49 m	/	2-4 m	Arid	Commune de Sidi Slimane

Chapitre I-La région d'études

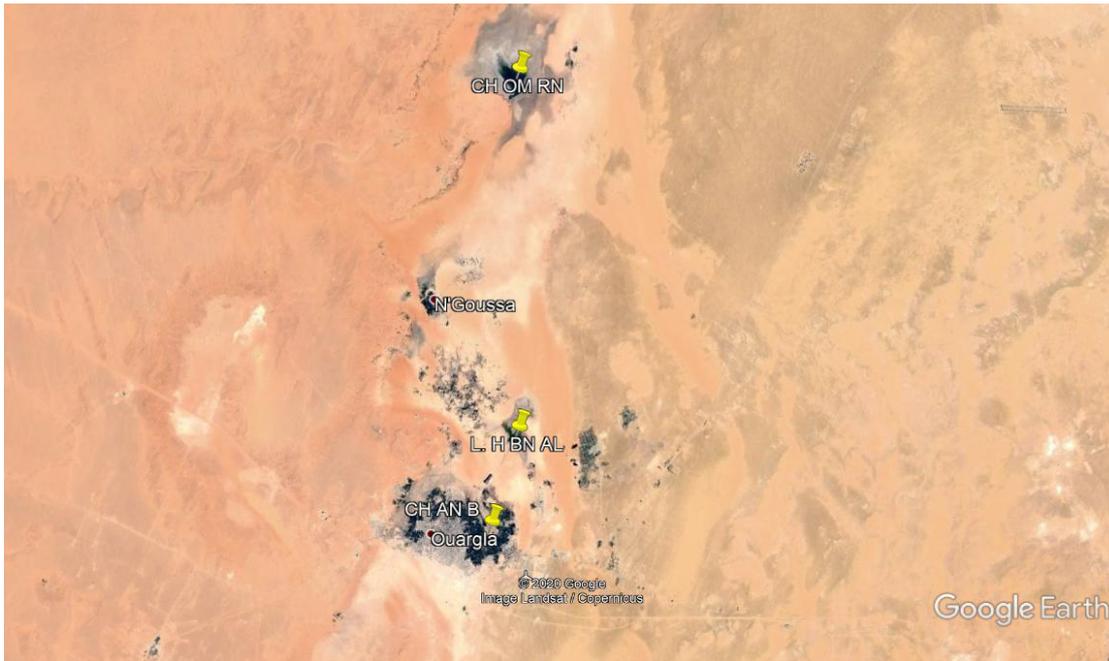


Figure 13 : les points de prélèvements des échantillons (Région de Ouargla).

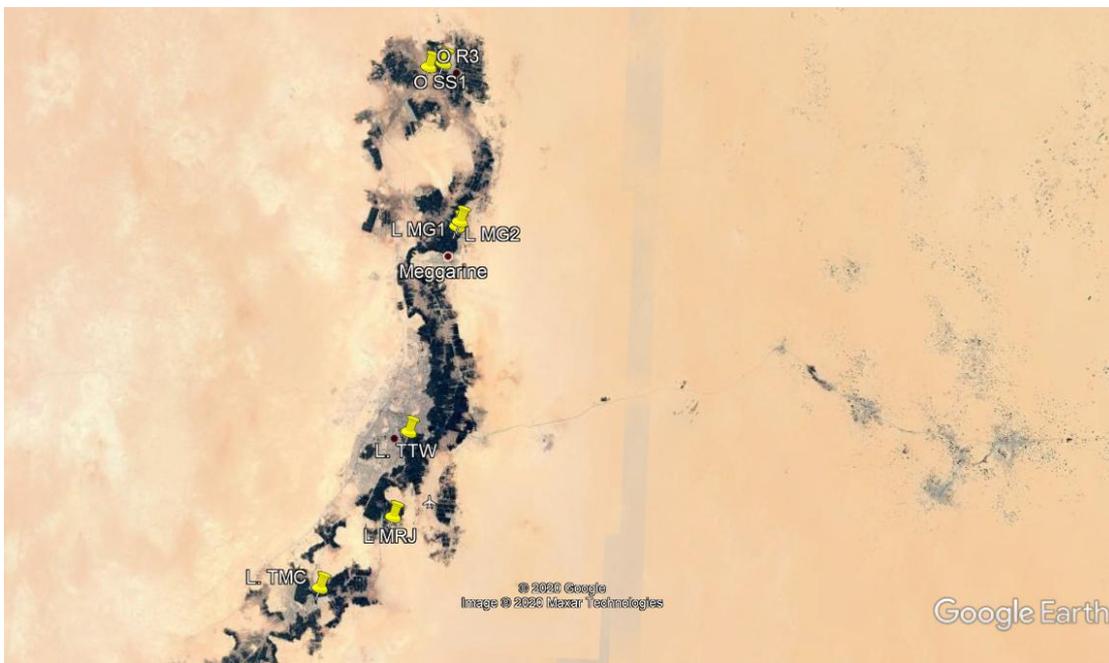


Figure 14 : les points de prélèvements des échantillons (Région de Touggourt).

CHAPITRE II

CHAPITRE II - MATÉRIELS ET MÉTHODES

II-1-Matériels utilisé

1-1. Matériel biologique

➤ Microorganismes

La microalgue utilisé a été isolée de plusieurs lacs .des échantillons d'eaux ont été prélevés à différents endroits de chaque lacs.

1-2.Matériel non biologique

Tout le matériel non biologique utilise dans laboratoire (appareils, verrerie, réactifs et solutions) et d'échantillonnage :

➤ Matériel de laboratoire

Réfrigérateur, Les tubes à vis et portoir, Becher, Eprouvette graduée, Entonnoir, Erlenmeyer, Fiole jaugée, Verre de montre, Bec bunsen, Spatule, Balance, Flacons, Pipette, Microscope optique, Autoclave, Agitateur, Etuve Agar agar, L'eau distillée, NaNO_3 , K_2HPO_4 , MgSO_4 , CaCl_2 , Citric acid, Ammonium ferric citrate green, EDTANa_2 , Na_2CO_3 , H_3BO_3 , MnCl_2 , ZnSO_4 , Na_2MoO_4 , CuSO_4 , $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$, KH_2PO_4 , 2.5 g NaCl, vitamin B1, vitamin B12 FeCl_3 , ZnCl_2 , CoCl_2 .

➤ Matériel d'échantillonnage

- Corde, Seau, Glacier, Passoire, Des bouteilles.



Figure 15 : Passoire et corde utilisé

II-2. Méthode utilisé

2-1.Méthode d'échantillonnage

Le mode de prélèvement de l'eau diffère selon son origine. A chaque point de prélèvement des sous échantillonnages ont été effectuée .certains ont été utilisé pour effectuées des observations microscopiques, d'autres ont servi d'inoculum pour les différents isolements prévus (Chader, 2009).

L'opération a été réalisée le Octobre 2019, par temps ensoleillé, à une température de 30°C en début Du matin (10h). La profondeur à laquelle les prélèvements ont été effectuées est d'environ 30 à 300 cm, Il est important de noter que pour les analyses biologiques (ensemencements prévus pour l'identification des microalgues après culture) le sol du fond, légèrement gélatineux, laissant supposer le développement de microalgues, a été légèrement remué avant la collecte, afin de maximiser les chances de collecte de micro-algues. Des bouteilles de 250 ml de contenance, préalablement stérilisées ont été utilisées. Elles n'ont été ouvertes qu'une fois plongées dans l'eau (Iltis, 1980 ; Rodier et al, 2009). Sur chacune un numéro d'ordre a été attribué avec la date, lieu de récolte et le numéro du prélèvement (Chader, 2009).



Figure 16 : la conservation des échantillons dans laboratoire de département

➤ **Souches**

Les échantillons ont été prélevés au mois d'octobre des régions de sud.

On distingue 2 types différents d'échantillons :

- Les algues qui baignent à l'intérieur de l'eau.
- Les algues qui flottent sur l'eau



Figure 17 : methode d'échantillonnage.

CHAPITRE II - MATÉRIELS ET MÉTHODES

2-2. Analyses physicochimiques

L'appréciation de la qualité des eaux de surface se base sur la mesure de paramètres physico-chimiques et chimiques ainsi que sur la présence ou l'absence d'organismes et de micro-organismes aquatiques, indicateurs d'une plus ou moins bonne qualité de l'eau.

Ces données peuvent être complètes par l'analyse des sédiments (boues), qui constituent une "mémoire" de la vie de la rivière, notamment des épisodes de pollution par les métaux lourds, les polychlorobiphényles (PCB), les hydrocarbures aromatiques polycycliques (PCB) ou d'autres matières organiques non biodégradables. L'ensemble de ces éléments permet d'évaluer le degré de pollution des cours d'eau et d'apprécier leur capacité à s'auto-épurer.

2-2-1. Principaux paramètres physico-chimiques et mesurables

➤ Température

La température de l'eau joue un rôle important par exemple en ce qui concerne la solubilité des sels et des gaz dont, entre autres, l'oxygène nécessaire à l'équilibre de la vie aquatique. Par ailleurs, la température accroît les vitesses des réactions chimiques et biochimiques d'un facteur 2 à 3 pour une augmentation de température de 10 degrés Celsius (°C). L'activité métabolique des organismes aquatiques est donc également accélérée lorsque la température de l'eau s'accroît.

➤ PH

Le pH d'une eau permet de mettre en évidence les espèces chimiques présentes dans un échantillon. On parle alors de pH acide, de pH neutre ou de pH basique. La mesure du pH est réalisée par une méthode potentiométrique en mesurant la différence de potentiel entre une électrode de verre et une électrode de référence.

Le pH est une mesure de l'acidité de l'eau c'est-à-dire de la concentration en ions d'hydrogène (H⁺). L'échelle des pH s'étend en pratique de 0 (très acide) à 14 (très alcalin) ; la valeur médiane 7 correspond à une solution neutre à 25°C. Le pH d'une eau naturelle peut varier de 4 à 10 en fonction de la nature acide ou basique des terrains traversés. Des pH faibles (eaux acides) augmentent notamment le risque de présence de métaux sous une forme ionique plus toxique. Des pH élevés augmentent les concentrations d'ammoniac, toxique pour les poissons.

CHAPITRE II - MATÉRIELS ET MÉTHODES

➤ **Conductivité Électrique (EC)**

La conductivité électrique (EC) est une expression numérique de la capacité d'une solution à conduire le courant électrique. La plupart des sels minéraux en solution sont de bons conducteurs. Par contre, les Composés organiques sont de mauvais conducteurs. La conductivité électrique standard s'exprime généralement en millisiemens par mètres (mS/m) à 20 ° C. La conductivité d'une eau naturelle est comprise entre 50 et 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

L'estimation de la quantité totale de matières dissoutes peut être obtenue par la multiplication de la valeur de la conductivité par un facteur empirique dépendant de la nature des sels dissous et de la température de L'eau. La connaissance du contenu en sels dissous est importante dans la mesure o' chaque organisme aquatique a des exigences propres en ce qui concerne ce paramètre. Les espèces aquatiques ne supportent généralement pas des variations importantes en sels dissous qui peuvent être observés par exemple en cas de déversements d'eaux usés.

Conductivité : unité : $\mu\text{S}/\text{cm}$ à une température de 25 ° C

La conductivité permet d'évaluer rapidement et approximativement la minéralisation globale de l'eau. La mesure de conductivité est réalisée en mesurant la conductance d'une eau entre 2 Electrodes métalliques, elle est l'inverse de la résistivité électrique.

➤ **Azote ammoniacal selon la norme : unité : mg/l NH₄**

La présence d'azote ammoniacal (NH₄) dans une eau traduit un processus de dégradation incomplète de la matière organique. Une première méthode de détermination se fait par la mise en œuvre d'une réaction colorée et d'un dosage en spectrophotométrie d'absorption moléculaire. Elle permet de doser des concentrations faibles pour les eaux de consommation et les eaux de rivières.

➤ **Nitrites : UNITÉ: MG/L NO₂**

Les nitrites proviennent soit d'une oxydation incomplète de l'ammoniaque, soit d'une réduction des nitrates sous l'influence d'une action dénitrifiante. Une eau qui renferme des nitrites est à considérer comme suspecte. Pour connaître la méthode de détermination voir ° “ anions “.

➤ **SILICE (SiO₂) : UNITÉ : MG/L SiO₂**

Méthode colorimétrique, l'acide molybdique, en présence d'ions silicates (SiO₃), forme un complexe silicomolybdique de couleur jaune puis est réduit par l'acide ascorbique en un complexe bleu. Le mesurage de l'absorbance du complexe formé est effectué à 650nm

CHAPITRE II - MATERIELS ET METHODES



Figure 18 : la boîte des réactifs colorimétrique pour l'analyse chimique.



Figure 19 : quelque analyse colorimétrique.

CHAPITRE II - MATERIELS ET METHODES

2-2-2. Milieux et conditions de culture

➤ MILIEU BG11 : (Allen et Stanier, 1968)

C'est le milieu standard de culture minéral des cyanobactéries, parfois utilisé pour d'autres microalgues dont la composition figure en (Tableau..). qui a été utilisé pour l'isolement des microalgues.

TABLEAU 6: LA COMPOSITION DE MILIEU DE BG11.

composition	Pour litre
(1) NaNO ₃	15.0 g
composition	pour 500 ml
(2) K ₂ HPO ₄	2.0 g
(3) MgSO ₄ .7H ₂ O	3.75 g
(4) CaCl ₂ .2H ₂ O	1.80 g
(5) Citric acid	0.30 g
(6) Ammonium ferric citrate green	0.30 g
(7) EDTANa ₂	0.05 g
(8) Na ₂ CO ₃	1.00 g
(9) Trace métal solution:	pour litre
H ₃ BO ₃	2.86 g
MnCl ₂ .4H ₂ O	1.81 g
ZnSO ₄ .7H ₂ O	0.22 g
Na ₂ MoO ₄ .2H ₂ O	0.39 g
CuSO ₄ .5H ₂ O	0.08 g
Co(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	0.05 g
Medium	pour litre
Stock solution 1	100.0 ml
Stock solutions 2 8	10.0 ml
Stock solution 9	1.0 ml

CHAPITRE II - MATERIELS ET METHODES

➤ MILIEU BBM

Tableau 7: LA COMPOSITION DE MILIEU BBM

solutions en g / 1000 ml d'eau distillée	pour 1 litre finale
(1) 25.0 g NaNO ₃	30.0 ml
(2) 2.5 g CaCl ₂ .2H ₂ O	10.0ml
(3) 7.5 g MgSO ₄ .7H ₂ O	10.0 ml
(4) 7.5 g K ₂ HPO ₄ .3H ₂ O	10.0 ml
(5) 17.5 g KH ₂ PO ₄	10.0 ml
(6) 2.5 g NaCl	10.0 ml
(7) trace element solution/ FeCl ₃ .6H ₂ O	6.0 ml 97.0 mg
MnCl ₂ .4H ₂ O	41.0 mg
ZnCl ₂ .6H ₂ O	5.0 mg
CoCl ₂ .6H ₂ O	2.0 mg
Na ₂ MoO ₄ .2H ₂ O	4.0 mg
(8) vitamin B1	1.0 ml
(9) vitamin B12	1.0 ml



Figure 20 : préparation des solutions des milieux de la culture

CHAPITRE II - MATERIELS ET METHODES

2-2-3.Ensemencements et conditions d'incubation

Le milieu de culture (BG11et BBM) gélosé a été réparti à raison de 30ml par boîte de Pétri, les boîtes ont été inoculé par 1 ml d'eau prélevé du lac, et soigneusement étalé au moyen d'un étaioire en verre. Les incubations ont été réalisées, dans une chambre (Salle de Phyto) thermostatée grâce à un climatiseur à température de 25°C. Les boîtes disposées sur des étagères (Figure2) ont été exposées par périodes à un éclairage (Photopériodes : (Lumière/Obscurité) : 16/8) d'intensité lumineuse de 3230 lux pour les boîtes disposées sur la première rangée face au néon, et de 1000 lux environ pour les boîtes situées derrière la première rangée, la lumière étant produite par des tubes au néon de type OSR OW F18/T8/D, nous avons fait subir tous les trois jours une permutation aux boîtes de Pétri afin d'éliminer toute hétérogénéité due à la position relative des boîtes sur les étagères (Reynaud et Roger, 1977). La durée d'incubation a varié de 15 à 21 jours.



Figure 21 : milieux de culture (solide et liquide).



Figure 22 : milieux de culture solide BBM et BG11

2-2-4.Procédure d'isolement

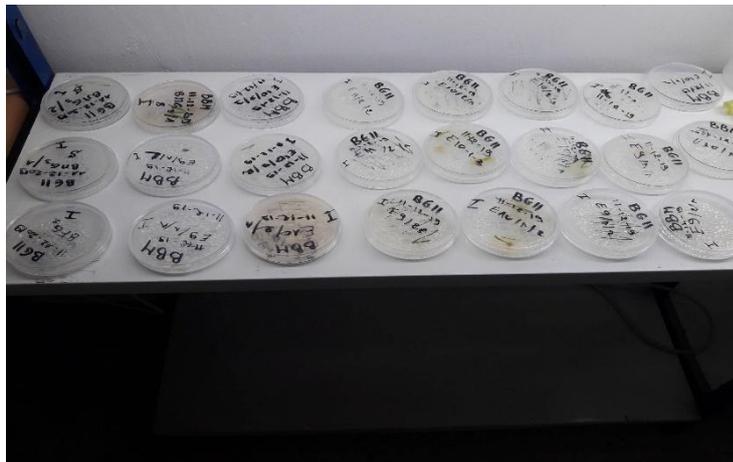


Figure 23 : dispositions des boites de BBM et BG11 sur les étagères de la chambre de culture des microalgues.

➤ Phase d'enrichissement

Cette étape d'enrichissement visait à la réactivation des cellules des microalgues et la purification des cultures. Des tubes contenant chacun un milieu de BG 11 et de BBM (Tableau) fermés par du coton, les tubes sont ensuite placés en face de la fenêtre, pendant 7 jours après une régulation de la température de la salle à 25 °C.



Figure 24 : Cultures d'enrichissement

2-2-5. Culture sur milieu solide BG-11 ET BBM

Compléter à 1 litre avec de l'eau désionisée. Ajuster le pH à 7,1 avec NaOH 1M ou HCl. Pour l'agar, ajouter 15,0 g par litre d'agar bactériologique (Oxoid L11) *. Autoclave à 15 psi pendant 15 minutes.

Des boîtes de pétri (Figure22) contenant milieu BG 11 solide et BBM (BG 11 liquide + 0,1 % agar) sontensemencées chacune par 100 μ L de l'une des cultures enrichies et incubées dans une chambre à 25 °C en face de la lumière . Les colonies isolées sont repiquées sur milieu BG 11 solide.

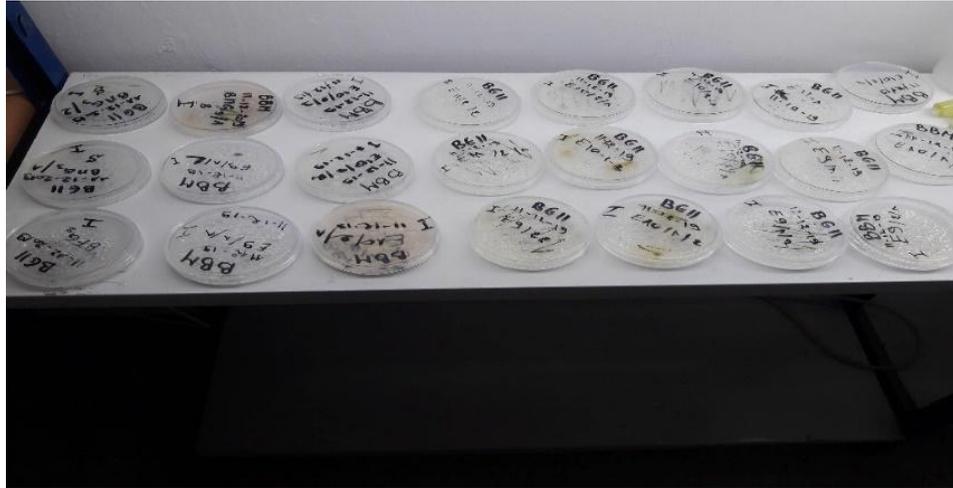


Figure 25 : Cultures sur milieu solide

2-3-1. Conservation des souches

Les souches sont conservées à l'abri de la lumière sur milieu BG 11 solide. Un repiquage est effectué à intervalles réguliers de 1 mois.

2-3-2. Déroulement des cultures

➤ Comparaison des taux de croissance des différentes souches

1. Pré culture

Pour pouvoir suivre la cinétique de croissance des différentes souches, des pré-cultures sont préparées dans le milieu BG 11 dans des tubes en verre fermés avec du coton, incubés à 25 °C en face de la fenêtre pour 12 jours .

2. Cultures

Des erlenmeyers de 250 ml contenant chacun 50 ml de BG 11 sontensemencés à partir des précultures de manière à avoir une densité optique initiale de 0,1

CHAPITRE III

CHAPITRE III - RESULTATS ET DISCUSSION

III-1-Résultats des analyses physicochimiques

les analyses physico-chimique de l'eau après une bonne stratégie d'échantillonnage on a pu d'avoir des différents résultats présentent dans le tableau ci-dessous

Tableau 8: RESULTAT DES ANALYSES PHYSICOCHEMIQUES

Code d'échantillon	T	PH	Conductivité	NH4	NO2	NO3	Fe	Sio2	PO4	La région
S 1	24,8	7,768	126725	<0,05	<0,01	<0,5	<0,02	>6,0	<0,02	Sidi Slimane
S 2	26,7	7,891	67300	<0,05	<0,01	<1	<0,02	>6,0	<0,02	Lac megarine (lala fatna)
S 3	27,7	8,039	76166,6	<0,05	<0,1	<0,5	<0,02	>6,0	<0,02	lala fatna a cote de lac
S 4	25,33	7,543	/	<0,05	0,6	1	<0,02	>6,0	<0,02	Lac megarine
S 5	29,03	7,833	21000	<0,05	<0,025	<0,5	<0,02		<0,02	Merjaja
S 6	26,66	7,64	16806,66	<0,05	<0,01	<0,5	<0,02	>6,0	<0,02	Temacine
S 7	25,53	8,153	/	<0,05	<0,01	<0,5	<0,02	>6,0	<0,02	Lac Hassi b abdallah
S 8	26,3	8,38	/	<0,05	<0,01	<0,5	<0,02	>6,0	<0,02	Cett om raneb
S 9	24,06	8,28	/	<0,05	<0,01	<0,5	<0,02	>6,0	<0,02	Chett a baida

CHAPITRE III - RESULTATS ET DISCUSSION

III-2. Identification phénotypique

Identification se fait par le guide d'identification de ... (année)

Tableau 9 : EDENTIFICATION phénotypique DES ECHANTILLONS

	<i>PINNULARIA SP</i>	<i>Mougeotia sp</i>	<i>oocystis sp</i>	<i>scenedesmus sp</i>	<i>Navicula</i>	<i>Microcoleus</i>	<i>Ankistrodesmus</i>	<i>Nitzschia</i>
S1	30	8	50	282	23	54	12	41
S2								
S3	41	23	23	224	29	43	7	17
S4	64	0	7	538	15	49	3	9
S5	7	9	13	583	14	37	4	8
S6	9	26	16	482	33	48	3	4
S7	1	18	15	218	10	7	3	0
S8	2	13	15	662	15	10	7	9
S9	7	6	7	869	7	15	9	12

-EF : échantillon **- esp** : espèce **- L** : lame

CHAPITRE III - RESULTATS ET DISCUSSION

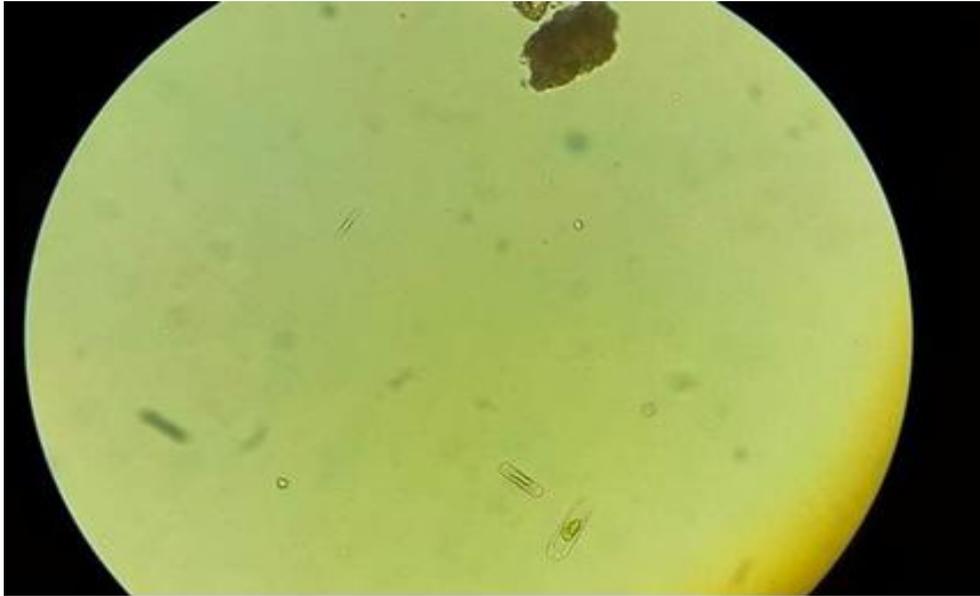


Figure 28 : *PINNULARIA SP*



Figure 29 : *Mougeotia sp*

CHAPITRE III - RESULTATS ET DISCUSSION

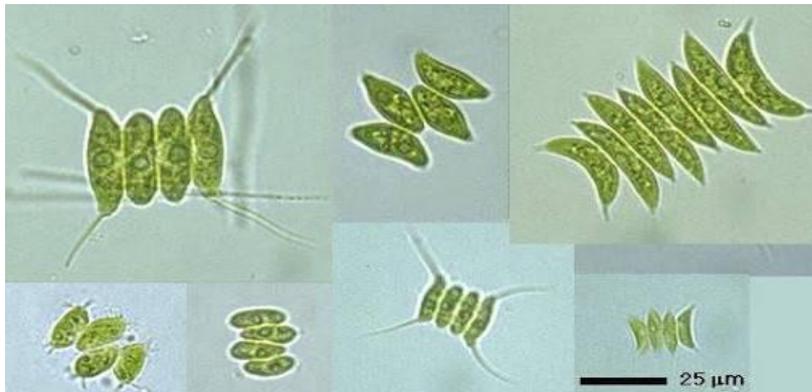


Figure 30 : *scenedesmus sp*



Figure 31 : *oocystis sp*

CHAPITRE III - RESULTATS ET DISCUSSION

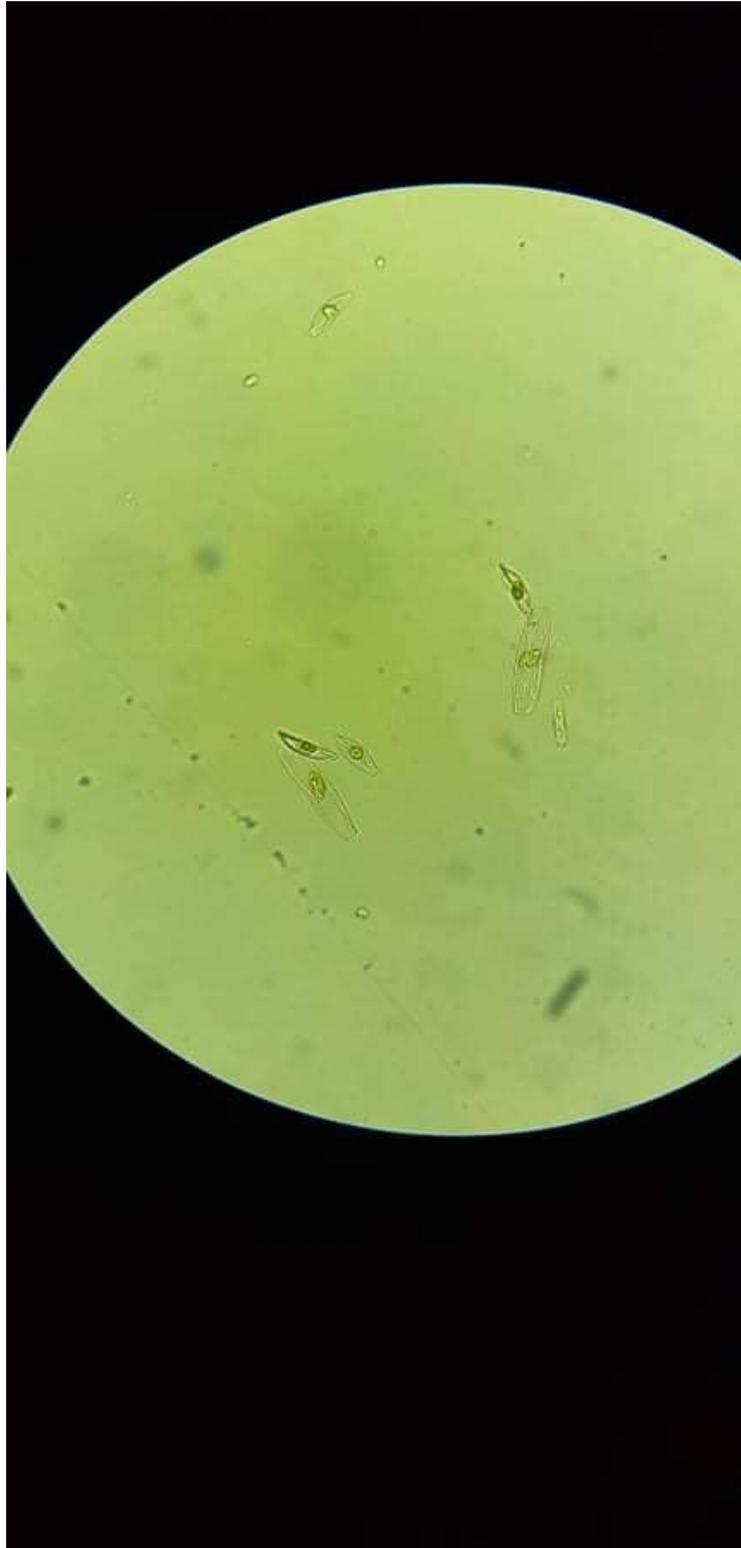


Figure 32 : *Navicula*

CHAPITRE III - RESULTATS ET DISCUSSION



Figure 33 : *Microcoleus*



Figure 34 : *Ankistrode smus*



Figure 35 : *Nitzschia*

Conclusions

Conclusions

La culture d'algues peut être intégrée dans les installations actuelles de traitement des eaux usées avec peu ou pas de changement aux infrastructures existantes. Cette approche permettra de réduire des problèmes d'investissement, de coûts de maintenance et d'évolutivité avec une efficacité de traitement améliorée.

L'objectif principal de notre travail était d'isoler et de caractériser des souches algériennes de microalgues pour Bien que de nombreuses recherches soient menées sur cet aspect, des lacunes de recherche existent des domaines tels que la conception de photobioréacteurs, la technologie de récolte, les méthodes de séchage et d'autres processus en aval qui, s'ils sont travaillés, peuvent conduire à une exploitation commerciale efficace de cette technologie éco énergétique économe en énergie.

La biotechnologie des micro-algues, en particulier pour le traitement des eaux usées, a reçu plus d'attention ces dernières années comme alternative viable aux systèmes de traitement des eaux usées conventionnels. La biomasse d'algues produite au cours de ce processus est une bioressource durable pour les biocarburants, les nutraceutiques, les biofertilisants, les aliments pour animaux, les aliments pour volaille et les aliments aquatiques. Malgré son attractivité, il reste encore quelques obstacles à résoudre pour son exploitation à grande échelle.

Le résultats primaires qu'on a obtenu sont semblable et similaire au résultat d'autre recherche On a pas pu continuer notre études à cause de l'épidémie covid19

Liste des références

- ❖ Abdel-Raouf N, Al-Homaidan AA, Ibraheem IBM (2012) Microalgae and wastewater treatment. Saudi J Biol Sci 19(3):257–275
- ❖ Álvarez-Góngora CC, Herrera-Silveira J (2006) Variations of phytoplankton community structure related to water quality trends in a tropical karstic coastal zone. Mar Pollut Bull 52:48–60 .
- ❖ BANZAOUI N et ELBOUZ F., 2009, Epuration des eaux usées par les procédés des boues activées au niveau de la commune de Touggourt. Mem.Ing. chimie.Univ. D'Annaba.
- ❖ BAOUIA, A., HABBAZ, D., 2006, La situation d'assainissement et d'évacuation des eaux usées de la ville d'Ouargla et caractérisation des eaux de Chott de Ain El Baida. Mém. Ing. Eco et Env. Ecosystème steppique et saharien. Unid'Ouargla.22p.
- ❖ BECHAC J., BOUTIN P., MERCIER B., 1983, Traitement des eaux usées. 2ème Edition.BEAUDRY J.P., 1984, Traitement des eaux. Edition le Griffon d'Aigle Inc, 231p.
- ❖ BEKKOUCHE M., ZIDANE F., 2004, Conception d'une station d'épuration des eaux usées de la ville d'Ouargla par lagunage. Mem. Ing. Hydraulique saharienne. Univ. D'Ouargla.67p.
- ❖ BOILEAU, Marie-Eve. 2015. Evaluation du potentiel d'utilisation d'une eau usée industrielle comme substrat de culture pour des microalgues d'eau douce dans une optique de production de biocombustibles de 3e génération évaluation du potentiel d'utilisation d'une eau usée industrielle. Centre universitaire de formation en environnement et développement durable, Université de Sherbrooke. s.l.: BOILEAU, Marie-Eve, 2015. p. 97.
- ❖ Borowitzka MA, Borowitzka LJ (1988) Micro-algal biotechnology. Cambridge University Press, Cambridge .
- ❖ Brennan, Liam, et Philip Owende. 2009. «Biofuels from microalgaeA review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. s.l.: Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009.

- ❖ CA (Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture) (2007) Water for food, water for life: a comprehensive assessment of water management in agriculture. Earthscan/ International Water Management Institute, Colombo/London.
- ❖ Cai T, Park SY, Li Y (2013) Nutrient recovery from wastewater streams by microalgae: status and prospects. *Renew Sust Energ Rev* 19:360–369. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.030>.
- ❖ Cantin, Isabelle. juillet 2010. La production de biodiesel à partir des microalgues ayant un métabolisme hétérotrophe. CENTRE UNIVERSITAIRE DE FORMATION EN ENVIRONNEMENT, UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE. Québec: s.n., juillet 2010.
- ❖ Cho, D. H., Ramanan, R., Heo, J., Lee, J., Kim, B. H., Oh, H. M., Kim, H. 490 S.(2015).Enhancing microalgal biomass productivity by engineering a microalgal–bacterial 491 community. *Bioresource Technology*, 175, 578-585.
- ❖ Chocat, B., Coord, 1997, Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement, Lavoisier. Paris, France. 1124 p.
- ❖ De la Noue J, de Pauw N (1988) The potential of microalgal biotechnology: a review of production and uses of microalgae. *Biotechnol Adv* 6(4):725–770.
- ❖ DEGREMANT, 2005, Mémento technique de l'eau. Tomel. 9 ème 6d.
- ❖ EDLINE F, 1980, L'épuration physico-chimique des eaux.3eme édition. Ed. CEBEDOC.
- ❖ El-Enany AE, Issa AA (2000) Cyanobacteria as a biosorbent of heavy metals in sewage water. *Environ Toxicol Pharmacol* 8(2):95–101.
- ❖ file:///C:/Users/infoplus/Desktop/Nouveau%20dossier%20(2)/Application-of-Microalgae-in-Wastewater-Treatment-2019_.pdf.
- ❖ file:///C:/Users/infoplus/Desktop/Nouveau%20dossier%20(2)/Application-of-Microalgae-in-Wastewater-Treatment-2019_.pdf.
- ❖ Gonzalez-Camejo J, Barat R, Pachés M, Murgui M, Seco A, Ferrer J. (2018). Wastewater 507 nutrient removal in a mixed microalgae–bacteria culture: effect of light and temperature on 508 the microalgae–bacteria competition. *Environmental Technology*, 39, 503-515.

- ❖ Grobbelaar JU (2004) Algal nutrition - mineral nutrition. In: Richmond A (ed) Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology. Blackwell Publishing Ltd, Ames, pp 95–115.
- ❖ Hamdi M. (1995). Biofilm thickness effect on the diffusion limitation in the bioprocess 515 reaction: Biofloc critical diameter significance. Bioprocess engineering, 12, 193-197.
- ❖ Hermosilla Gomez Z (2009) Methodological development for the correct evaluation of the ecological status of the coastal waters of the Valencian Community, within the framework of the Water Framework Directive, using chlorophyll a as an indicator parameter of quality Universitat Politècnica de València.
<https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/6064>.
- ❖ https://www.researchgate.net/publication/327845792_Identifier_des_microalgues_pour_le_traitement_des_eaux_usees_et_la_production_de_biocarburant
- ❖ https://www.researchgate.net/publication/327845792_Identifier_des_microalgues_pour_le_traitement_des_eaux_usees_et_la_production_de_biocarburant.
- ❖ Kelly-Gerreyn BA, Anderson TR, Holt JT, Gowen RJ, Proctor R (2004) Phytoplankton community structure at contrasting sites in the Irish Sea: a modelling investigation. Estuar Coast Shelf Sci 59:363–383.
- ❖ L'utilisation des microalgues pour la fabrication de biocarburants : analyse de la chaîne de valeur - contexte français et international.
- ❖ LADJEL F., 2006, Exploitation d'une station d'épuration à boue activée niveau 02. Centre De formation au métier de l'assainissement. CFMA-Boumerdes. 80p.
- ❖ Lau PS, Tam NFY, Wong YS (1996) Wastewater nutrients removal by *Chlorella vulgaris*: optimization through acclimation. Environ Technol 17(2):183–189.
- ❖ Livingston RJ (2001) Eutrophication processes in coastal systems: origin and succession of plankton blooms and effects on secondary production in Gulf Coast estuaries. CRC Press, New York.
- ❖ Ma X, Zhou W, Fu Z, Cheng Y, Min M, Liu Y, Zhang Y, Chen P, Ruan R (2014) Effect of wastewaterborne bacteria on algal growth and nutrients removal in wastewater-based algae cultivation system. Bioresour Technol 167:8–13.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.05.087>

- ❖ Mahapatra DM, Chanakya HN, Ramachandra TV (2014) Bioremediation and lipid synthesis through mixotrophic algal consortia in municipal wastewater. *Bioresour Technol* 168:142–150.
- ❖ Mani D, Kumar C (2014) Biotechnological advances in bioremediation of heavy metals contaminated ecosystems: an overview with special reference to phytoremediation. *Int J Environ Sci Technol* 11(3):843–872.
- ❖ MEDJANI F. 2016. Variation des paramètres physicochimiques des eaux des sebkhas de la région Ouargla-Touggourt (sud-est algérien), UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA Faculté des Sciences de la Terre Département de Géologie, p20-23.
- ❖ Mehta SK, Gaur JP (2005) Use of algae for removing heavy metal ions from wastewater: progress and prospects. *Crit Rev Biotechnol* 25(3):113–152.
- ❖ MOUHAMMED OUALI S., 2001, Procédés unitaires biologique de traitement des eaux.
- ❖ Mulbry W, Kondrad S, Pizarro C, Kebede-Westhead E (2008) Treatment of dairy manure effluent using freshwater algae: algal productivity and recovery of manure nutrients using pilot-scale algal turf scrubbers. *Bioresour Technol* 99:8137–8142.
- ❖ Olguín EJ (2003) Phycoremediation: key issues for cost-effective nutrient removal processes. *Biotechnol Adv* 22:81–91. [https://doi.org/10.1016/S0734-9750\(03\)00130-7](https://doi.org/10.1016/S0734-9750(03)00130-7)
- ❖ Olguín EJ (2012) Dual purpose microalgae–bacteria-based systems that treat wastewater and produce biodiesel and chemical products within a biorefinery. *Biotechnol Adv* 30:1031–1046. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2012.05.001>
- ❖ Olguín EJ, Sanchez-Galvan G (2012) Heavy metal removal in phytofiltration and phycoremediation: the need to differentiate between bioadsorption and bioaccumulation. *New Biotechnol* 30:3–8.
- ❖ Oswald, W.J., Gotaas, H.B., Ludwig, H.F. Lynch, V. (1953). Algae symbiosis in oxidation 554 ponds, III. Photosynthetic Oxygenation. *Sewage and Industrial Wastes*, 25, 692-705.
- ❖ Padisák J, Borics G, Grigorszky I, Soróczki-Pintér É (2006) Use of phytoplankton assemblages for monitoring ecological status of lakes within the water framework directive: the assemblage index. *Hydrobiologia* 553:1–14.

- ❖ Park JBK, Craggs RJ, Shilton AN (2011) Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production. *Bioresour Technol* 102:35–42.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.158>.
- ❖ PERSON, Julie. 2010. *LIVRE TURQUOISE Algues, filières du futur*. s.l.: Adebitech, Romainville, 2010. p. 182.
- ❖ Priyadarshani I, Sahu D, Rath B (2011) Microalgal bioremediation: current practices and perspectives. *J Biochem Technol* 3(3):299–304.
- ❖ Ramanan, R., Kim, B. H., Cho, D. H., Oh, H. M., Kim, H. S. (2016). Algae–bacteria 575 interactions: evolution, ecology and emerging applications. *Biotechnology Advance*, 34, 14- 576 29.
- ❖ Razzak, S. A., Ali, S. A. M., & Hossain, M. M. (2017). Biological CO₂ fixation with production of microalgae in wastewater—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 379-390.
- ❖ Razzak, S. A., Hossain, M. M., Lucky, R. A., Bassi, A. S., & de Lasa, H. (2013). Integrated CO₂ capture, wastewater treatment and biofuel production by microalgae culturing—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 622-653.
- ❖ RICHARD C., 1996, *Les eaux, les bactéries, les hommes et les animaux*. Ed. Scientifiques et médicale Elsevier. Paris.
- ❖ Richmond, A. 1986. *Algal mass culture*. Florida: CRC Press, 1986
- ❖ SAGGAI M., 2004, *Contribution à l'étude d'un System d'épuration à plantes macrophytes pour les eaux usées de la ville de Ouargla*. Mem. Mgister. Univ. Ouargla.64p.
- ❖ Schindler DW, Hecky RE, Findlay DL, Stainton MP, Parker BR, Paterson MJ, Beaty KG, Lyng M, Kasian SEM (2008) Eutrophication of lakes cannot be controlled by reducing nitrogen input: results of a 37–year whole–ecosystem experiment. *Proc Natl Acad Sci U S A* 105(32):11254–11258.
- ❖ Sengar RMS, Singh KK, Singh S (2011) Application of phycoremediation technology in the treatment of sewage water to reduce pollution load. *Ind J Sci Res* 2(4):33–39 .
- ❖ Shi J, Podola B, Melkonian M (2007) Removal of nitrogen and phosphorus from wastewater using microalgae immobilized on twin layers: an experimental study. *J Appl Phycol* 19(5):417–423 .

- ❖ Singh RL (2017) Principles and applications of environmental biotechnology for a sustainable future. Springer.
- ❖ Sivasubramanian V (2006) Phycoremediation of industrial effluents.
<http://phycoremediation.in/projects.html> .
- ❖ Stanier RY, Kunisawa R, Mandel M & Cohen-Bazire G (1971) Purification and properties of unicellular blue-green algae (Order Chroococcales). *Bacteriol. Rev.*35: 171-205.
- ❖ Suresh Kumar K, Dahms H-U, Won E-J, Lee J-S, Shin K-H (2015) Microalgae – A promising tool for heavy metal remediation. *Ecotoxicol Environ Saf* 113:329–352.
- ❖ Van Den Hende, S., Carré, E., Cocaud, E., Beelen, V., Boon, N., Vervaeren, H. 600 (2014). Treatment of industrial wastewaters by microalgal bacterial flocs in sequencing batch 601 reactors. *Bioresource Technology*, 161, 245-254.
- ❖ Wang, S., Liu, J., Li, C., Chung, B. M. (2018). Efficiency of *Nannochloropsis oculata* and 611 *Bacillus polymyxa* symbiotic composite at ammonium and phosphate removal from synthetic 612 wastewater. *Environmental Technology*, 1-10.
- ❖ Xiong J-Q, Kurade MB, Shanab R AIA, Ji MK, Choi J, Kim JO, Jeon BH (2016) Biodegradation of carbamazepine using freshwater microalgae *Chlamydomonas mexicana* and *Scenedesmus obliquus* and the determination of its metabolic fate. *Bioresour Technol* 205:183–190.
- ❖ Yang W, Zhou H, Cicek N (2014) Treatment of organic micropollutants in water and wastewater by UV-based processes: a literature review. *Crit Rev Environ Sci Technol* 44(13):1443–1476. <https://doi.org/10.1080/10643389.2013.790745>
- ❖ Zhu Z, Liu J (2008) Remote monitoring system of urban sewage treatment based on Internet. In: Automation and logistics, 2008. ICAL 2008. IEEE International Conference on IEEE, pp 1151–1155.