

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie des Procédés



Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de Master en

Domaine : Science et Technologie

Filière : Génie des Procédés

Spécialité : Génie des Procédés de l'Environnement

Présenté par :

Karima LEHELLA et Fatma Zohra MEKHLOUFI

Thème

**Synthèse bibliographique de traitement des eaux usées par
des microalgae dans le sud algérien**

Membres de jury d'évaluation :

Zerrouki djamal	Pr	Président	UKM Ouargla
------------------------	-----------	------------------	--------------------

Chennouf nasreddine	Pr	Encadrant	UKM Ouargla
----------------------------	-----------	------------------	--------------------

Zighmi souad	MCA	Examinatrice	UKM Ouargla
---------------------	------------	---------------------	--------------------

Année universitaire : 2023/2024

الملخص :

تعتبر المياه من أهم الموارد الطبيعية على وجه الأرض، إذ تلعب دوراً حيوياً في بقاء الحياة، ويقوم الإنسان باستغلالها واستخدامها بطرق عديدة، مما يلعب دوراً كبيراً في تلوثها بسبب الصناعات والأنشطة الزراعية. والنفايات المنزلية. هناك العديد من الطرق لمعالجة مياه الصرف الصحي، لذلك يلجأ العديد من الباحثين إلى طرق معالجة طبيعية وفعالة من حيث التكلفة، حيث أن تنقية المياه بالطحالب الدقيقة هي وسيلة فعالة وتساهم بشكل كبير في عملية التنقية، لأن الطحالب الدقيقة تمتص المواد الضارة من المياه وتستخدمها الغذاء لنموهم. وكجزء من هذا العمل، تهدف دراستنا إلى العثور على أنواع الطحالب الأكثر ملاءمة لمعالجة مياه الصرف الصحي في جنوب الجزائر، حيث أظهرت معظم الدراسات أن طحالب شلوريلا بيرينويدوسا متوافقة بشكل كبير مع معالجة مياه الصرف الصحي في منطقتنا.

الكلمات المفتاحية: مياه الصرف الصحي، معالجة المياه، الطحالب الدقيقة

Résumé :

L'eau est l'une des ressources naturelles les plus importantes sur terre, car elle joue un rôle vital dans la survie de la vie, et il existe de nombreuses façons que les humains exploitent et utilisent, qui jouent un rôle majeur dans leur pollution par les activités industrielles et agricoles. et les ordures ménagères. Il existe de nombreuses méthodes de traitement des eaux usées, c'est pourquoi de nombreux chercheurs ont recours à des méthodes de traitement naturelles et rentables, car la purification de l'eau avec des microalgues est une méthode efficace et contribue de manière significative au processus de purification, car les microalgues absorbent les substances nocives de l'eau et les utilisent comme nourriture pour leur croissance. Dans le cadre de ce travail, notre étude vise à trouver les types d'algues les plus adaptés au traitement des eaux usées dans le sud de l'Algérie, où la plupart des études ont montré que les algues de type *Chlorella pyrenoidosa* sont hautement compatibles avec notre zone de traitement des eaux usées.

Mots clés: eau usée, traitement d'eau, microalgue

Abstract:

Water is one of the most important natural resources on earth, as it plays a vital role in the survival of life, and there are many ways that humans exploit and use, as it plays a major role in its pollution from industrial and agricultural activities. And household waste. There are many wastewater treatment methods, and for this reason many researchers resort to natural and cost-effective treatment methods, as microalgae water purification is an effective method and contributes significantly to the purification process, as microalgae absorb harmful substances from water and use them as food for their growth. As part of this work, our study aims to find the most suitable types of algae for wastewater treatment in southern Algeria, where most studies have shown that *Chlorella pyrenoidosa*-like algae are highly compatible with our wastewater treatment area.

Keywords: wastewater, water treatment, microalgae

REMERCIEMENTS

Louange à Dieu, qui nous a guidés, guidés, fortifiés et nous a permis d'achever ce travail après notre voyage pour remettre les lettres à leur centre et révéler ce qui se cache derrière le voile de la science et du savoir.

Ce sont les fruits de nos connaissances qui ont mûri et il est temps de les cueillir. Ce sont nos paroles éparées que nous murmurons à l'oreille de quiconque ouvre ce mémo pour emporter avec lui ce qu'il veut et aspire et critiquer ce qu'il rejette. Par-dessus tout, nous remercions Dieu pour le succès.

. Nous adressons nos sincères remerciements au superwiseur pédagogique, «Pr Nasreddine CHENNOUF». Nous remercions également les membres du comité de discussion. Et un merci tout particulier au "Dr Ridha CHERRAÏE" pour toute l'aide qu'il a fournie sur le plan scientifique et éditorial. Nous exprimons également nos remerciements généraux à tous les professeurs et à tous ceux qui nous ont enseigné les lettres. Nous remercions également tous ceux qui nous ont aidé directement ou indirectement.

Dédicace

Louange à Dieu avec amour, remerciement et gratitude, le début et la fin. Louange à Dieu, Seigneur des Mondes.) Après la fatigue et les épreuves, j'ai pris le rêve et la connaissance qui porte les vœux, et je suis resté debout. Chaque nuit, et aujourd'hui, ma fatigue est devenue la prunelle de mes yeux. Aujourd'hui, je suis sur le point d'obtenir mon diplôme, récoltant les fruits de mon travail et levant mon chapeau avec fierté, Dieu merci. Le vôtre avant d'être satisfait, et le vôtre après que vous soyez satisfait.

Avec tout amour, je dédie les fruits de ma réussite et de mon témoignage

A celui qui a orné mon nom des plus beaux titres, à celui qui m'a soutenu sans limites et qui m'a donné gratuitement, à celui qui m'a appris que le monde est un combat et que son arme est le savoir et le savoir, oh mon premier soutien dans ma vie, mon chemin, mon soutien, ma force et mon refuge après Dieu, ma fierté et ma fierté.

(Mon père)

À celle à qui Dieu a placé le paradis sous ses pieds, a embrassé son cœur dans ses mains et a soulagé mes épreuves par ses prières, au cœur miséricordieux et à la bougie qui était pour moi dans les nuits obscures, le secret de ma force et le succès, mon paradis.

(Ma mère)

À mon soutien dans la vie et à mon ange, à celui qui a éliminé les problèmes de mon chemin, m'a ouvert la voie et m'a inculqué confiance et détermination, à ceux avec qui Dieu a renforcé mon soutien et a été une bénédiction d'aide, et à mes soeurs:

(Safia & Maria)

Aux fleurs avec lesquelles Dieu m'a béni pour expérimenter le beau goût de la vie, à ces anges qui ont changé les concepts d'amour, d'amitié et de soutien dans ma vie, amis du chemin.

(Nourelhouda & Malak & Rekia & Chaima)

À tous ceux qui m'ont donné force et conseils, ont cru en moi et m'ont soutenu dans les moments difficiles pour arriver là où je suis aujourd'hui. À tous ceux qui m'ont appris une lettre et à mes pairs et collègues, que Dieu leur accorde le succès.

LEHELLA KARIMA

Dédicace

Celui qui a dit "Je suis à la hauteur" l'a obtenue.

Le voyage n'a pas été court, et il ne devait pas l'être. Le rêve n'était pas proche, et le chemin n'était pas pavé de facilités.

Mais je l'ai fait, et je l'ai obtenu. Grâce à Dieu, avec amour, reconnaissance et gratitude, aujourd'hui je regarde un rêve longtemps attendu, et il est devenu une réalité dont je suis fière.

À mon ange pur, ma force après Dieu, mon premier et éternel soutien, "ma mère", je te dédie cet accomplissement qui n'aurait pas existé sans tes sacrifices. Je suis reconnaissante à Dieu de t'avoir choisie pour moi parmi les humains comme mère, toi le meilleur soutien et la meilleure compensation.

À une partie de moi et à une âme dans le ciel, que Dieu ait pitié de toi, à celui qui m'a soutenue sans limites et m'a donné sans compter, "mon père".

À ceux dont on a dit : "Nous renforcerons ton bras par ton frère". À celui qui a tendu la main sans relâche ni lassitude en temps de faiblesse, "mon frère", que Dieu te garde comme un pilier solide pour moi.

À celle qui a cru en mes capacités et en la sécurité de mes jours, "ma grande sœur". À celle qui me rappelle ma force et se tient derrière moi comme mon ombre, "ma sœur cadette". À celle qui a partagé mes peines et mes joies et qui a été à mes côtés dans les épreuves, "mon amie".

Merci à tous du fond du cœur pour votre soutien inestimable et votre amour inconditionnel. Cet accomplissement est le fruit de notre force collective et de notre dévouement mutuel. Que Dieu vous bénisse tous et vous accorde paix et bonheur.

MEKHOULFI FATMA ZOHRA

LISTE DES FIGURES

Figure I-1 : Étapes de traitement des eaux usées	15
Figure I-2 : Modèle de station d'épuration.	21
Figure II-1: Schéma d'une structure de micro-algue unicellulaire	24
Figure II-2: Photographie d'une cyanophycée Nostoc ou Crachat.....	25
Figure II-3: Photographie d'une rhodophycée Stylonema Alsidii.....	25
Figure II-4: Les Chrysophycées (algues dorées).....	26
Figure II-5: Les chlorophycées (algues vertes).....	26
Figure II-6: Les Euglenophycées	27
Figure II-7: Les bacillariophycées (diatomées)	28
Figure II-8: Principales classes de microalgues, leurs espèces les plus importantes et leur activité biologique associée	30
Figure II-9: Phases lumineuse et obscure de la réaction de photosynthèse.	31
Figure II-10: représentation du chloroplaste et de ses structures internes : il est possible de noter l'enveloppe interne et externe et le réseau des thylakoïdes. A droite, une image au microscope électronique image d'un chloroplaste.	32
Figure II-11 : Illustration des types de chlorophylle.....	34
Figure III-1: Photographie aérienne des bassins de culture d'Earthrise Nutritionals.	39
Figure III-2: systèmes fermés de culture de microalgues. A= Photobioréacteur plat du laboratoire de Physiologie et de Biotechnologie des Algues de l'Ifremer, , B= Photobioréacteur tubulaire d'un volume de 1000L en Australie. C= Photobioréacteurs de l'Algaeparc aux Pays Bas.....	40
Figure III-3: Mécanisme d'interactions métal-microbe au cours du processus de bioremédiation.	43
Figure III-4: Interaction des consortiums algues-bactéries.....	44
Figure III-5: Un schéma des étapes et des conditions opératoires nécessaires à la création de consortiums de microalgues et de bactéries pour traiter les eaux usées et produire du biodiesel.	46
Figure III-6: Utilisations industrielles actuelles des algues	47
Figure III-7: Biodiesel à partir de biomasse de microalgues	48
Figure III-9: Méthodes utilisées pour la production de bioéthanol à base de microalgues.	49
Figure IV-1: une courbe graphique comparant l'évolution des concentrations de [Pb].....	62

Figure IV-2: une courbe graphique comparant l'évolution des concentrations de [Cd]	63
Figure IV-3 : Résultats du traitement à la Chlorella pyrenoidosa avant et après le traitement....	65
Figure IV-4: l'analyse de C.Pyrenoidosa.....	67
Figure IV-5: l'analyse de Chorococcum.sp	68

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1 : different type de dégrillage	16
Tableau II-1: Résumé des groupements majeurs des algues selon les botanistes	29
Tableau III-1: Conditions de culture des microalgues	41
Tableau III-2: des avantages et inconvénients du traitement aux microalgues	45
Tableau III-3: Espèces de microalgues qui ont des composés bioactifs utiles.....	50
Tableau IV-1 : des caractéristiques et résultats du traitement des eaux usées avec <i>Chlorella pyrenoidosa</i>	55
Tableau IV-2: Tableau de variation en pourcentage de la DCO par <i>Lyngbya</i> ,sp	57
Tableau IV-3: Tableau de variation en pourcentage de la DCO par <i>Chlorella</i>	58
Tableau IV-4: Tableau de variation en pourcentage de la NO ₃ par <i>Lyngbya</i> ,sp.....	58
Tableau IV-5: Tableau de variation en pourcentage de la NO ₃ par <i>Chlorella</i>	59
Tableau IV-6: Tableau de variation en pourcentage de la PO ₄ par <i>Lyngbya</i> , sp	60
Tableau IV-7: Tableau de variation en pourcentage de la PO ₄ par <i>Chlorella</i>	61
Tableau IV-8: données générales de la STEP.....	66
Tableau IV-9: résume les caractéristiques des eaux usées brutes utilisées dans cette expérience.	67
Tableau IV 10: des études bibliographiques.....	70

LIST D'ABREVIATION

AAS : Spectrophotomètre d'adsorption atomique

BG11: Allen's Blue-Green

CO : Composé organique

DBO 5 : La demande biochimique en oxygène

DCO : Demande chimique en oxygène

DIRS : Dynamique interaction et Réactivité des systèmes

DO : Oxygène dissous

EPP : Eaux products de pétrole

ERU : Eaux résiduelles urbaines

LEE : Laboratoire Eau-Environnement

MBR : Bioréacteur membranaire

NT: Azote Total

OMS : Organisation mondiale de la santé

PE : Polyéthène

PP : Polypropylène

PT: Phosphore total

PVC: Polychlorure de vinyle

SST: Total Suspended Solids

ST: Solides totaux

TDS: Total Dissolved Solids

WC : Eaux de toilette

SOMMAIRE

Résumé	I
Remèrciments	III
Dédicace.....	IV
Liste des figures.....	VI
Liste des Tableaux	VIII
Liste d'abréviation.....	IX
Sommaire.....	X
Inrtoduction générale.....	1
Chapitre I Généralités sur le traitement des eaux usées	4
I. 1 Définition des eaux usées	4
I. 2 Origine des eaux usées	4
I. 2. 1 Origine industrielle	5
I. 2. 2 Origine domestique	5
I. 2. 3 Eau usée pluviales	6
I. 2. 4 Eau usée agricole	6
I. 3 La composition des eaux usées	6
I. 3. 1 Les matières en suspension	7
I. 3. 2 Les micropolluants organique et non organique	7
I. 4 Les caractéristiques physiques	9
I. 4. 1 La température	9
I. 4. 2 L'odeur	9
I. 4. 3 Couleur	9
I. 4. 4 Turbidité	10
I. 4. 5 Matières en suspension	10
I. 5 Les caractéristiques chimiques	10
I. 5. 1 Potentiel hydrogène (pH)	10

SOMMAIRE

I. 5. 2	La conductivité électrique	10
I. 5. 3	Azote	11
I. 5. 4	Les Nitrites	11
I. 5. 5	La demande biochimique en oxygène (DBO ₅)	11
I. 5. 6	La demande chimique en oxygène (DCO)	11
I. 6	Les Caractéristiques biologiques	11
I. 6. 1	Les bactéries	11
I. 6. 2	Les virus	11
I. 6. 3	Les protozoaires	12
I. 6. 4	Les helminthes	12
I. 7	Risques de la pollution par eaux usées	12
I. 7. 1	Risque sur la santé humaine	12
I. 7. 2	Risque sur l'environnement.....	13
I. 8	Étapes de traitement des eaux usées	14
I. 8. 1	Prétraitement	15
I. 8. 2	Traitement primaire	17
I. 8. 3	Traitement secondaire (biologique)	17
I. 8. 4	Traitement tertiaire ou les traitements complémentaires	20
I. 9	L'objectif d'un centre de traitement des eaux usées est le suivant	21
Chapitre II	Généralités sur les microalgues	22
II. 1	Les algues	22
II. 2	Les micro-algues	22
II. 2. 1	Définition et Origine des micro-algues	22
II. 2. 2	Caractéristiques des micro-algues	23
II. 2. 3	Une diversité d'espèces	23
II. 2. 4	classification des microalgues	24
II. 2.5	Autres types de microalgues.....	27
II. 2. 6	La photosynthèse	30
II. 2. 7	Les phases de photosynthèse	31
II. 2. 8	Le chloroplaste	31
II. 2. 9	Reproduction des microalgues	35

SOMMAIRE

Chapitre III	Méthodes de culture des microalgues pour le traitement des eaux usées	36
III. 1	Principales techniques de culture des microalgues	36
III. 1. 1	La culture des microalgues	36
III. 1. 2	Récolte et séchage.....	36
III. 1. 3	Exigences du milieu de culture pour la croissance.....	37
III. 1. 4	Les modes de culture	38
III. 1. 5	Les conditions de culture	41
III. 2	Mécanismes de traitement des eaux usées par les microalgues	41
III. 2. 1	Assainissement de l'environnement par l'utilisation de microalgues	42
III. 2. 2	Co-culture de microalgues pour le traitement des eaux usées	43
III. 3	Avantages et limites de l'utilisation des microalgues dans le traitement des eaux usées	45
III. 4	Choix des souches de microalgues pour le traitement des eaux usées	46
III. 4. 1	Endurance et résistance	46
III. 4. 2	Taux de croissance et de productivité	46
III. 4. 3	Propriétés biologiques et chimiques	47
III. 5	Les applications des microalgues	47
III. 5. 1	Biodiesel	48
III. 5. 2	Bioéthanol	48
III. 5. 3	Biométhane	49
III. 5. 4	Bio-hydrogène	49
III. 5. 5	Composés bioactifs	50
III. 5. 6	Engrais et biofertilisants	50
III. 5. 7	Alimentation animale	51
III. 5. 8	Production de biopolymères	51
Chapitre IV	D'étude et Potentiel applications dans le sud algérien	52
IV. 1	L'étude : Traitement des eaux produites de pétrole (EPP) par des microalgues et études des procédés de récupération de la biomasse.....	52
IV. 1. 1	Site d'étude.....	52
IV. 1. 2	Méthode et matériaux	53
IV. 1. 3	Analyse et résultat	55

SOMMAIRE

IV. 2 L'étude : Traitement de l'eau du journal désinfecté en utilisant deux types d'algues <i>Chlorella</i> , <i>Lyngbya</i> , sp	56
IV. 2. 1 Site d'étude.....	56
IV. 2. 2 Méthode et matériaux	56
IV. 2. 3 Analyse et résultat	56
IV. 3 L'étude : Le rôle de certaines algues bleu-vert dans la biotransformation de certains éléments métalliques lourds.....	.61
IV. 3. 1 Site d'étude.....	.61
IV. 3. 2 Méthode et matériaux	.61
IV. 3. 3 Analyse et résultat	62
IV. 4 L'étude : Culture de <i>Chlorella pyrenoidosa</i> dans des étangs extérieurs à ciel ouvert utilisant les eaux usées domestiques comme milieu dans les zones désertiques arides	64
IV. 4. 1 Site d'étude:	64
IV. 4. 2 Méthode et matériaux	64
IV. 4. 3 Analyse et résultat	65
IV. 5 L'étude : Traitement des eaux usées par les microalgues.....	66
IV. 5. 1 Site d'étude.....	66
IV. 5. 2 Méthode et matériaux	66
IV. 5. 3 Analyse et résultat	66
IV. 6 Évaluation de l'efficacité du traitement des eaux usées par les microalgues.....	69
Conclusion générale.....	71
Références bibliographiques.....	73
Résumé.....	80

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

L'eau est un élément essentiel et un partenaire quotidien de l'homme dans la vie sur terre. Il constitue une grande partie de la structure des organismes vivants et est essentiel à de nombreux processus biologiques tels que la digestion, le métabolisme et la réfrigération. De plus, il joue un rôle crucial dans l'environnement à travers le cycle de l'eau, affectant le climat, les conditions météorologiques et le sol. Cependant, l'eau est confrontée à des défis tels que la pollution et la rareté dans certaines régions.

L'eau est utilisée pour répondre aux besoins quotidiens de consommation et d'hygiène ainsi que pour la boisson, la cuisson des aliments, la production alimentaire, la fabrication de produits, l'hygiène personnelle, l'assainissement du cadre de vie, la production d'électricité et les usages récréatifs. En raison de la croissance démographique, de l'augmentation des besoins agricoles et industriels, de l'évolution des habitudes de consommation, de l'expansion des réseaux d'approvisionnement en eau et du changement climatique, la demande totale en eau augmente.[1]

La pollution de l'eau fait référence à l'ajout ou à la présence de substances nocives dans l'eau, qu'elles soient organiques ou inorganiques, pouvant avoir un impact négatif sur la vie végétale et animale, et causer des dommages à l'environnement et à la santé humaine.

La qualité de l'eau dans les pays industrialisés a atteint un niveau préoccupant. La contamination des eaux usées municipales, agricoles et industrielles par un grand nombre de polluants organiques et inorganiques, tels que les microplastiques, les xénobiotiques, les métaux lourds et les fortes concentrations de nitrates, de phosphates et de composés carbonés, exerce une pression sur la chaîne alimentaire. Le traitement des eaux usées est un problème mondial qui ne peut être géré par une seule technologie en raison de la grande variabilité des échelles, des types de polluants et des conditions régionales.[2]

La pollution de l'eau peut être considérée comme une menace importante pour l'homme et l'environnement, et parmi les polluants qui affectent la qualité de l'eau figurent ceux qui favorisent la croissance des microalgues.

Les microalgues sont de petits groupes d'algues qui ne peuvent être identifiées qu'au microscope. À ce jour, $15,7 \times 10^4$ espèces de microalgues ont été identifiées, et il en reste encore

d'autres à découvrir[3]. Il effectue la photosynthèse et comprend environ 3 000 espèces aquatiques. La grande majorité d'entre eux sont autotrophes. Les microalgues peuvent se développer dans diverses sources d'eau et convertir la lumière du soleil et le dioxyde de carbone atmosphérique en biomasse.[4]

La perspective mondiale sur les micro-algues se tourne vers un intérêt croissant et des avancées rapides dans plusieurs domaines. L'intérêt réside dans leur utilisation comme source d'énergie renouvelable, purification de l'eau, production d'aliments et de suppléments riches en protéines et en vitamines. La recherche et les applications technologiques prospèrent dans ce domaine, ouvrant des perspectives prometteuses pour l'utilisation durable et efficace des micro-algues dans divers domaines.

Les micro-algues sont une source importante de nombreux produits et services durables et contribuent à résoudre de nombreux défis environnementaux, alimentaires et médicaux. Les microalgues utilisent la lumière du soleil plus efficacement que les autres plantes cultivées pour produire de l'huile. Sa capacité de production de pétrole est environ deux fois supérieure à celle de toute autre culture énergétique.[5]

Les eaux usées contiennent une grande quantité de nutriments nécessaires à la croissance des microalgues. Des études ont montré que les algues constituent une bonne solution pour le traitement biologique des eaux usées.[6]

Oswald et ses collègues de l'Université de Californie se sont concentrés sur la culture à grande échelle de microalgues pour la production de biomasse et le traitement des eaux usées.[7]

Notre étude vise à réaliser une étude bibliographique des études antérieures dans le but de couvrir tous les travaux liés à l'utilisation de microalgue pour le traitement des eaux usées.

Ce présent travail est divisé en quatre chapitres :

➤ Le premier chapitre :

Il comprend des informations générales sur les eaux usées, discute de leur nature et de leur composition générale, ainsi que de la manière dont les étapes traditionnelles de traitement sont réalisées.

➤ Le deuxième chapitre :

Il Comprend des généralités sur les microalgues, Ce chapitre a pour objectif de décrire les algues en général et les microalgues en particulier et présente la diversité des microalgues, leur origine et leur nature physiologique.

➤ Le troisième chapitre :

Il discute des méthodes de culture de microalgues dans les eaux usées. Ce chapitre examine les principes les plus importants de la culture des microalgues et les facteurs les plus importants qui l'influencent.

➤ Le quatrième chapitre :

Présent des études et des applications potentielles dans le microalgue dans le sud algérien. Il convient de noter les résultats les plus importants que nous avons obtenus de cette étude Enfin, le résultat obtenu est présenté sous forme de conclusion.

CHAPITRE I

GÉNÉRALITÉS SUR LE

TRAITEMENT DES EAUX USÉES

Chapitre I Généralités sur le traitement des eaux usées

I. 1 Définition des eaux usées :

Rejsek (2002) a défini les eaux usées comme étant les eaux résiduaires urbaines (ERU), ou eaux usées, qui sont chargées de polluants, qu'ils soient solubles ou non, provenant principalement de l'activité humaine. [8]

De même, Grosclaude (1999) a également défini les eaux usées comme étant généralement un mélange de matières polluantes répondant à ces catégories, dispersées ou dissoutes dans l'eau utilisée à des fins domestiques ou industrielles.[9]

En parallèle, Selghi (2001) a expliqué que les eaux usées sont altérées par les activités humaines, qu'elles soient domestiques, industrielles, artisanales, agricoles ou autres. Elles sont considérées comme polluées et doivent donc être traitées avant toute réutilisation ou rejet dans les milieux naturels récepteurs.[10]

I. 2 Origine des eaux usées :

Les eaux usées urbaines comprennent les eaux provenant des activités domestiques telles que le lavage corporel et du linge, le nettoyage des locaux, ainsi que les eaux vannes chargées de fèces et d'urines. Ces effluents sont généralement dilués dans une certaine mesure par les eaux de lavage des voiries et les eaux pluviales. Dans certains cas, des eaux industrielles et agricoles peuvent également s'y ajouter. L'eau collectée dans les réseaux d'égouts apparaît comme un liquide trouble, souvent grisâtre, contenant des matières en suspension d'origine minérale et organique, avec des concentrations extrêmement variables. En plus des eaux de pluie, les eaux usées urbaines sont principalement d'origine domestique, mais elles peuvent également contenir des eaux résiduaires industrielles présentant une grande diversité.[11] Ainsi, les eaux usées urbaines se composent de :

- Eaux résiduaires ou eaux usées d'origine domestique, industrielle et/ou agricole
- Eaux pluviales ou de ruissellement urbain.

I. 2. 1 Origine industrielle :

La qualité et le degré de pollution des eaux usées sont largement déterminés par les déchets et les effluents industriels. Les installations industrielles utilisent une quantité significative d'eau, dont seule une petite fraction est réellement consommée, le reste étant rejeté. On peut classer les principaux rejets industriels en fonction de la nature des inconvénients qu'ils génèrent [4] :

- Pollution causée par les matières en suspension minérales (lavage du charbon, exploitation minière, tamisage du sable et du gravier, industries produisant des engrais phosphatés...)
- Pollution causée par les matières en solution minérale (usines de décapage, galvanisation...)
- Pollution due aux matières organiques et aux graisses (industries agroalimentaires, équarrissages, fabrication de pâte à papier...)
- Pollution causée par les rejets d'hydrocarbures et de divers produits chimiques (raffineries de pétrole, élevages porcins, produits pharmaceutiques...)
- Pollution due aux rejets toxiques (déchets radioactifs non traités, effluents radioactifs des installations nucléaires...).

Les eaux résiduaires d'origine industrielle ont généralement une composition spécifique directement liée au type d'industrie concernée. En plus de la charge en pollution organique ou minérale, de leur caractère putrescible ou non, elles peuvent présenter des caractéristiques de toxicité distinctes liées aux produits chimiques qu'elles contiennent.

I. 2. 2 Origine domestique :

Les effluents domestiques sont un mélange d'eaux contenant les déchets humains : urines, fèces (appelées eaux vannes) ainsi que les eaux utilisées pour la toilette et le nettoyage des sols et des aliments (appelées eaux ménagères). Ces eaux sont généralement composées de matières organiques dégradables et de matières minérales, présentes sous forme dissoute ou en suspension. Elles se composent principalement des eaux évacuées des toilettes et des eaux de cuisine et de salle de bain :

- Les eaux de cuisine contiennent des matières minérales en suspension issues du lavage des légumes, des produits alimentaires à base de matières organiques (glucides, lipides, protéines) ainsi

que des produits détergents utilisés pour laver la vaisselle, ce qui facilite la solubilisation des graisses.

- Les eaux de buanderie contiennent principalement des résidus de détergents.
- Les eaux de salle de bain sont chargées en produits utilisés pour l'hygiène corporelle, généralement des matières grasses hydrocarbonées.
- Les eaux vannes proviennent des toilettes (WC) et sont très chargées en matières organiques hydrocarbonées, en composés azotés, phosphatés et en micro-organismes. [11]

I. 2. 3 Eau usée pluviales :

Les eaux de pluie s'écoulent dans les rues où elles ramassent des polluants atmosphériques, des poussières, des déchets, des résidus de combustion et des hydrocarbures rejetés par les véhicules. Habituellement, ces eaux de pluie sont collectées conjointement avec les eaux usées, puis déversées dans le réseau d'assainissement et acheminées vers une station d'épuration. Cependant, elles sont souvent directement drainées dans les rivières, ce qui entraîne une pollution intense du milieu aquatique. [12]

I. 2. 4 Eau usée agricole :

La pollution d'origine agricole découle principalement de l'utilisation d'engrais et de pesticides répandus sur de vastes étendues de terres, souvent à proximité de cours d'eau. Ce type de pollution s'est accentué avec l'industrialisation croissante de l'agriculture. La concentration des élevages génère un surplus de déjections animales qui finissent par enrichir les cours d'eau et les nappes souterraines en dérivés azotés, contribuant ainsi à une pollution bactériologique. Par ailleurs, l'utilisation intensive d'engrais chimiques, notamment les nitrates et les phosphates, altère également la qualité des nappes souterraines vers lesquelles ils sont entraînés.[12]

I. 3 La composition des eaux usées :

La composition des eaux usées varie principalement en fonction de leur origine, qu'elle soit industrielle ou domestique. Elles peuvent renfermer une diversité de substances, à l'état solide ou dissous, ainsi que de nombreux microorganismes. Ces substances peuvent être classées en quatre groupes selon leurs caractéristiques physiques, chimiques, biologiques et leur potentiel de danger pour la santé : les matières en suspension, les microorganismes, les éléments traces minéraux ou organiques, et les substances nutritives.[13]

I. 3. 1 Les matières en suspension :

Les matières en suspension sont habituellement biodégradables. La majorité des microorganismes pathogènes présents dans les eaux usées sont transportés par ces matières en suspension, ce qui entraîne une apparence trouble, un goût désagréable et une odeur peu agréable de l'eau. Cependant, ces matières peuvent également présenter un intérêt pour l'irrigation des cultures.[14]

I. 3. 2 Les micropolluants organique et non organique :

Les micropolluants se retrouvent en quantités minuscules dans les eaux usées. Lorsque ces eaux usées traitées sont réutilisées, la principale voie de contamination est l'ingestion, ce qui rend la contamination par voie indirecte particulièrement préoccupante. Certains micropolluants, tels que les métaux lourds ou les pesticides, ont la capacité de s'accumuler dans les tissus des organismes vivants, notamment dans les plantes cultivées. Par conséquent, il existe un risque de contamination de la chaîne alimentaire et une concentration de ces polluants dans les organismes. [13]

I. 3. 2. 1 Eléments traces :

Les métaux lourds présents dans les eaux usées sont souvent présents en concentrations élevées, avec le fer, le zinc, le cuivre et le plomb parmi les plus abondants, tandis que l'aluminium, le chrome ou le manganèse sont présents à l'état de traces. Certains éléments traces, bien que peu nombreux, sont reconnus comme nécessaires au développement des végétaux, mais en très faibles quantités, tels que le bore, le fer, le manganèse, le zinc, le cuivre et le molybdène. L'irrigation à partir d'eaux usées peut fournir ces éléments aux plantes. [14]

I. 3. 2. 2 Micropolluants organique :

Les micropolluants organiques sont abondants et variés dans les eaux usées, provenant souvent de l'utilisation domestique de pesticides ou de détergents, ainsi que des eaux de ruissellement sur les terres agricoles. Ils peuvent également être issus de rejets industriels lorsque ceux-ci sont déversés dans les égouts, ou même des processus de désinfection des effluents par le chlore, générant des composés tels que les(haloformes).[15]

I. 3. 2. 3 Les substances nutritives :

Les éléments nutritifs essentiels tels que l'azote, le phosphore, le potassium, ainsi que les oligo-éléments comme le zinc, le bore et le soufre, sont présents en quantités significatives dans les eaux usées, qu'elles soient épurées ou non. Cependant, leurs proportions par rapport aux besoins des

plantes varient considérablement. En général, une épaisseur d'eau résiduelle de 100 mm peut fournir par hectare [2] :

- Entre 16 et 62 kg d'azote,
- Entre 2 et 69 kg de potassium,
- Entre 4 et 24 kg de phosphore,
- Entre 18 et 208 kg de calcium,
- Entre 9 et 100 kg de magnésium,
- Entre 27 et 182 kg de sodium.

I. 3. 2. 3. 1 L'azote :

L'azote présent dans les eaux usées se trouve généralement sous forme organique ou ammoniacale dissoute. Il est fréquemment oxydé pour prévenir une consommation d'oxygène (O_2) dans l'environnement et réduire le risque de toxicité lié à la présence d'ammoniac gazeux dissous (NH_3), en équilibre avec l'ion ammoniac (NH_4^+)[16]

I. 3. 2. 3. 2 Le potassium :

Le potassium se retrouve dans les effluents secondaires à des concentrations comprises entre 10 et 30 mg/l (équivalent à 12 à 36 mg/l de K_2O), ce qui permet ainsi de satisfaire partiellement les besoins en potassium. [13]

Il convient de souligner que tout excès de fertilisation potassique peut entraîner plusieurs conséquences néfastes. Cela inclut la possibilité de fixation du potassium dans un état peu accessible à l'échange, une augmentation des pertes par drainage dans les sols légers, ainsi qu'une surconsommation de potassium par les cultures. [17]

I. 3. 2. 3. 3 Le phosphore :

La concentration en phosphore dans les effluents secondaires oscille généralement entre 6 et 15 mg/l (équivalent à 15 à 35 mg/l en P_2O_5). Cette quantité est généralement considérée comme trop faible pour avoir un impact significatif sur le rendement.[18]

Cependant, en cas d'excès, le phosphore est principalement retenu dans le sol par des processus d'adsorption et de précipitation. Cette rétention est particulièrement efficace lorsque le sol contient

des quantités importantes d'oxydes de fer, d'aluminium ou de calcium. En général, les problèmes liés à un excès de phosphore ne sont pas courants.[19]

I. 3. 2. 3. 4 Le chlore et le sodium :

Ces sels peuvent provenir de différentes sources : naturelles (comme la mer avec une concentration de 27g/l de NaCl et les sols salés), humaines (comme les urines avec une concentration de 10 à 15g/l de NaCl) ou industrielles (notamment à partir de la potasse, de l'industrie pétrolière, de la galvanoplastie et de l'industrie agroalimentaire).[20]

I. 4 Les caractéristiques physiques :

I. 4. 1 La température :

Il est crucial de disposer d'une mesure précise de la température de l'eau. Cette variable revêt en effet une importance majeure dans divers processus. Elle influence la solubilité des sels ainsi que celle des gaz, impacte la dissociation des sels dissous, et par conséquent, la conductivité électrique. De plus, elle intervient dans la détermination du pH, dans l'analyse de l'origine de l'eau ainsi que des éventuels mélanges présents.[11]

I. 4. 2 L'odeur :

L'odeur peut être définie comme la perception des substances volatiles par l'organe olfactif, engendrant une sensation particulière dont la qualité est déterminée par chaque substance présente.

Dans le contexte de l'alimentation, il est essentiel que l'eau soit inodore, car toute odeur indique la présence potentielle de pollution ou de matière organique en décomposition. Ces substances peuvent être présentes en quantités si minimes qu'elles échappent souvent à la détection par les méthodes d'analyse conventionnelles. [11]

I. 4. 3 Couleur :

La coloration est un indicateur crucial de la pollution esthétique de l'eau, et elle peut avoir diverses origines :

- Naturelle :

Certaines eaux très minéralisées contiennent des substances humiques fortement colorées.

- **Eutrophisation :**

La prolifération d'algues ou de bactéries peut entraîner une coloration de l'eau en vert ou en rouge.

- **Chimique :**

Des colorants, des phénols et leurs dérivés, ainsi que des pigments chlorophylliens issus notamment de l'industrie agroalimentaire, peuvent altérer la couleur de l'eau.[21]

I. 4. 4 Turbidité :

La turbidité de l'eau est liée à sa transparence de manière inverse : elle augmente lorsque la transparence diminue. Elle résulte principalement de la présence de matières organiques ou minérales en suspension dans les eaux usées, ce qui peut indiquer un niveau de pollution. Son niveau varie en fonction des matières en suspension présentes.[22]

I. 4. 5 Matières en suspension :

La plupart de ces matières sont biodégradables et souvent adsorbent les micro-organismes, ce qui les transporte parfois dans les Matières en suspension, donnant une apparence trouble et une mauvaise odeur à l'eau. Malgré cela, elles peuvent être utiles pour l'irrigation des cultures. Les particules en suspension peuvent être éliminées par décantation, une étape difficile mais efficace pour réduire la charge organique et la présence de germes pathogènes dans les eaux usées. Cependant, pour traiter les risques sanitaires, un traitement plus poussé est généralement nécessaire[23]

I. 5 Les caractéristiques chimiques :

I. 5. 1 Potentiel hydrogène (pH) :

Le potentiel hydrogène (pH) est un indicateur de l'alcalinité des eaux usées, jouant un rôle essentiel dans la croissance des microorganismes. En général, ces organismes prospèrent dans une plage de pH optimale variant entre 6,5 et 7,5.[24]

I. 5. 2 La conductivité électrique :

La conductivité électrique est un paramètre simple et crucial utilisé pour évaluer la qualité des eaux usées. [24]

I. 5. 3 Azote :

L'azote organique est principalement présent dans les protéines, les polypeptides, les acides aminés et l'urée. [24]

I. 5. 4 Les Nitrites :

La nitrification est une étape cruciale du processus de métabolisation des composés azotés, intervenant également dans le cycle de l'azote entre l'ammonium et les nitrates. [24]

I. 5. 5 La demande biochimique en oxygène (DBO₅) :

La demande biochimique en oxygène (DBO) est une mesure de la quantité d'oxygène consommée par les micro-organismes lors de l'oxydation de la matière organique.[25]

I. 5. 6 La demande chimique en oxygène (DCO) :

La quantité d'oxygène requise pour oxyder entièrement le composé organique (CO) en CO₂, H₂O et NH₃ est ce qui est demandé. [25]

I. 6 Les Caractéristiques biologiques :

Les caractéristiques biologiques des micro-organismes présents dans les eaux usées sont à la base du traitement biologique. Ces micro-organismes comprennent, selon leur taille croissante : les virus, les bactéries, les protozoaires et les helminthes. Parmi les agents pathogènes les plus courants, on trouve :

I. 6. 1 Les bactéries :

Les eaux usées urbaines contiennent généralement environ 10⁶ à 10⁷ bactéries par 100 ml, parmi lesquelles environ 10³ sont pathogènes. Parmi les plus connues figurent les salmonelles, responsables de la typhoïde et de troubles intestinaux, ainsi que les colibacilles, qui ont une durée de vie de 2 à 3 mois et se multiplient dans l'environnement.[26]

I. 6. 2 Les virus :

Ce sont des organismes infectieux de très petite taille (10 à 350 nm) qui se reproduisent en infectant un organisme hôte. Les virus ne sont pas naturellement présents dans l'intestin, contrairement aux bactéries. Ils sont présents soit intentionnellement (après une vaccination contre la poliomyélite, par exemple), soit chez un individu infecté accidentellement [27]. Leur isolement et leur dénombrement dans les eaux usées restent difficiles, ce qui conduit vraisemblablement à une sous-estimation de leur nombre réel. Cependant, les virus entériques sont ceux qui se multiplient dans

le trajet intestinal. Parmi les virus entériques humains les plus nombreux, nous nous citerons les entérovirus (exemple : polio), les rotavirus, les rétrovirus, les adénovirus et le virus de l'Hépatite A. Il semble que les virus soient plus résistants dans l'environnement que les bactéries [28].

I. 6. 3 Les protozoaires :

Les protozoaires sont des organismes unicellulaires. La plupart des protozoaires pathogènes sont des organismes parasites, c'est-à-dire qu'ils se développent aux dépens de leur hôte. Certains protozoaires adopte au cours de leur cycle vital une forme de résistance, appelée kyste qui peut être véhiculé par les eaux résiduaires. Cette forme peut résister généralement aux procédés de traitements des eaux usées.[29]

I. 6. 4 Les helminthes :

Les helminthes sont des vers multicellulaires, principalement des organismes parasites, tout comme les protozoaires. Les œufs d'helminthes sont très résistants et peuvent survivre pendant plusieurs semaines, voire plusieurs mois, dans le sol ou sur les plantes cultivées. La concentration en œufs d'helminthes dans les eaux usées est généralement de l'ordre de 10 à 103 œufs par litre. [30]

I. 7 Risques de la pollution par eaux usées :

La contamination de l'eau constitue une altération qui rend son utilisation dangereuse et perturbe l'équilibre des écosystèmes aquatiques et de l'environnement. Elle peut affecter les eaux de surface ainsi que les eaux souterraines, et représente également un risque pour la santé publique.

I. 7. 1 Risque sur la santé humaine :

Les eaux usées peuvent contenir des pesticides, des micro-organismes pathogènes (virus, bactéries, parasites) et des substances toxiques, représentant ainsi un danger pour la santé humaine. Selon l'Organisation mondiale de la santé (OMS), 80% des maladies qui affectent la population mondiale sont directement liées à l'eau. Des millions de personnes souffrent constamment de gastro-entérites, de paludisme et d'onchocercose. Il convient de noter que la transmission de maladies par une eau contaminée n'est pas limitée aux pays en développement, et l'établissement de normes pour l'eau potable vise à fournir aux consommateurs une eau sans risque pour leur santé.[31]

I. 7. 2 Risque sur l'environnement:

I. 7. 2. 1 Impacts sur le sol :

Ces problèmes revêtent une importance particulière pour les agriculteurs, car ils peuvent entraîner une diminution de la productivité, de la fertilité et des rendements de leurs terres. Maintenir un niveau adéquat de fertilité du sol est essentiel pour assurer une utilisation durable à long terme et une rentabilité agricole. Les principaux défis auxquels les agriculteurs sont confrontés au niveau du sol comprennent :

 Salinisation:

L'accumulation de sels solubles dans le sol, souvent causée par une irrigation excessive, peut rendre les terres impropres à la culture en raison de l'augmentation de la salinité.

 Alcalinité et diminution de la perméabilité du sol:

L'augmentation du pH du sol (alcalinité) peut entraîner une diminution de sa perméabilité, ce qui limite la circulation de l'eau et des nutriments essentiels aux plantes.

 Accumulation d'éléments potentiellement toxiques:

Certains sols peuvent accumuler des éléments toxiques tels que le plomb, le cadmium ou l'arsenic, souvent issus de sources externes telles que les pesticides, les déchets industriels ou les polluants atmosphériques.

 Accumulation de nutriments :

Une accumulation excessive de nutriments tels que l'azote, le phosphore et le potassium peut perturber l'équilibre du sol, ce qui affecte la croissance des plantes et peut contribuer à la pollution de l'eau par lessivage.

Pour faire face à ces défis, les agriculteurs peuvent adopter des pratiques de gestion des sols telles que la rotation des cultures, l'utilisation de cultures de couverture, la mise en œuvre de systèmes d'irrigation efficaces et l'application de pratiques agricoles durables visant à maintenir la santé et la fertilité des sols.[32]

I. 7. 2. 2 Impacts sur les eaux superficielles :

Parfois, ces déchets sont déversés directement dans l'environnement naturel. Une concentration excessive de phosphates peut entraîner un phénomène d'eutrophisation, caractérisé par une prolifération d'algues qui réduit la teneur en oxygène de l'eau, pouvant ainsi causer la mort des poissons et d'autres organismes aquatiques. Les métaux lourds tels que le mercure, le chrome et l'arsenic peuvent avoir des effets néfastes sur les espèces aquatiques les plus sensibles. Dans certaines conditions physico-chimiques, ces métaux lourds, comme le mercure, peuvent s'accumuler le long de la chaîne alimentaire et avoir un impact sur la santé humaine.

Actuellement, il n'existe pas de système de valorisation pour les boues provenant du traitement des eaux usées, ni pour les déchets provenant des fosses septiques.[33]

I. 7. 2. 3 Impacts sur les eaux souterraines :

Dans certaines circonstances, les impacts sur les eaux souterraines peuvent être plus graves que sur le sol lui-même. La contamination des eaux souterraines par les composants des eaux usées est possible lors de leur infiltration dans le sol [12]

I. 8 Étapes de traitement des eaux usées :

Le processus de dépollution des eaux usées implique une série d'étapes qui font appel à des traitements physiques, physico-chimiques et biologiques. En plus d'éliminer les déchets les plus volumineux présents dans les eaux usées, le processus d'épuration doit au minimum permettre de retirer la majeure partie de la pollution carbonée.

Trois niveaux de traitement sont définis en fonction du degré d'élimination de la pollution et des procédés utilisés. Bien qu'il existe plusieurs filières de traitement, le choix d'un procédé approprié doit prendre en compte les conditions climatiques, les applications prévues et les aspects liés à l'investissement. Chaque procédé nécessite une série cohérente d'étapes pour être efficace.[34]

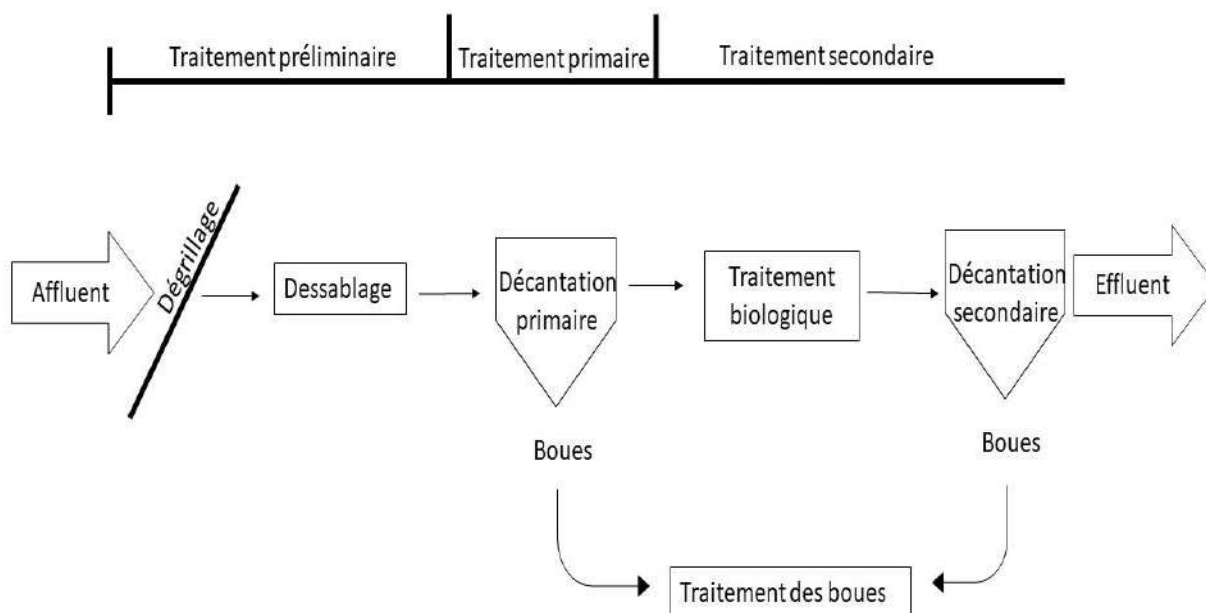


Figure I-1 : Étapes de traitement des eaux usées[35]

I. 8. 1 Prétraitement :

La première étape de traitement comprend trois principales étapes de nature physique ou mécanique. Elles visent à éliminer les déchets volumineux, les sables, les matières flottantes grossières et les liquides moins denses que l'eau. Cette phase est extrêmement critique car les déchets solides représentent environ 35% des polluants qui doivent être éliminés.[22]

I. 8. 1. 1 Dégrillage :

Le dégrillage et le tamisage consistent à retenir les gros déchets solides insolubles tels que le bois, le plastique, le papier, les bouteilles, les feuilles, etc. Ces déchets ne peuvent pas être éliminés par un traitement biologique ou physico-chimique, et nécessitent donc une élimination mécanique. Différents types de dégrillage sont définis en fonction de l'espacement des barreaux. Souvent, plusieurs étapes de dégrillage sont associées en série. Pour les eaux de ruissellement, il est généralement pratiqué un pré-dégrillage suivi parfois d'un dégrillage moyen. Ces systèmes sont généralement équipés de dispositifs automatiques de nettoyage pour éviter leur obstruction, ainsi que pour prévenir les dysfonctionnements des pompes.[36]

Tableau I-1 : différent type de dégrillage[36]

Type de dégrillage	Espacement des barreaux
Dégrillage fin	<10 mm
Dégrillage	10-30 mm
Pré- dégrillage	30-100 mm

I. 8. 1. 2 Dessablage :

Le dessablage vise à éliminer des eaux brutes les sables, les graviers, les particules minérales et les matières en suspension d'une granulométrie comprise entre 200 et 500 μm afin de prévenir les dépôts dans les canaux et conduites, et de protéger les pompes et autres équipements contre l'abrasion. L'eau s'écoule à une vitesse réduite dans un bassin appelé « dessableurs », ce qui entraîne le dépôt de ces particules au fond de la structure. Par la suite, ces particules sont aspirées par une pompe. Les sables extraits peuvent être lavés avant d'être mis en décharge afin de réduire le pourcentage de matières organiques, car leur dégradation peut entraîner des odeurs et une instabilité mécanique du matériau.[37]

- Plusieurs types de dessableurs sont disponibles, notamment [26] :
 - Les dessableurs conventionnels
 - Les dessableurs à canal à vitesse constante
 - Les dessableurs tangentiels
 - Les dessableurs aérés.

I. 8. 1. 3 Dégraissage ou déshuilage :

Généralement, le procédé de « flottation par air dissous » est utilisé pour éliminer les huiles. Son principe repose sur l'injection de fines bulles d'air dans le bassin de déshuilage, ce qui permet de faire remonter rapidement les graisses en surface. [37]

Par la suite, les graisses sont éliminées par raclage de la surface. Il est crucial de minimiser la présence de graisse dans les ouvrages en aval afin de prévenir l'encrassement des installations, en particulier des canalisations. Cette élimination est également essentielle pour réduire les problèmes de rejets d'aparticules graisseuses, les difficultés de décantation et les perturbations des échanges gazeux. [22]

I. 8. 2 Traitement primaire :

La décantation « primaire » se déroule généralement dans des bassins, souvent de forme cyclonique, bien que d'autres types de décanteurs soient également utilisés. Elle permet d'éliminer environ 70 % des matières minérales et organiques en suspension qui se déposent au fond du bassin, formant ainsi les boues dites « primaires ». Ces boues sont récupérées par raclage au fond du bassin puis dirigées vers des épaisseurs pour y être traitées.

Les performances de la décantation peuvent être améliorées par l'ajout de produits chimiques tels que le sulfate d'alumine, le chlorure ferrique, ou des agents de coagulation. Cette technique, appelée « floculation », permet de capter environ 90 % des matières en suspension. [22]

I. 8. 3 Traitement secondaire (biologique) :

Si le prétraitement fait appel à des procédés physiques, le traitement secondaire consiste en une épuration biologique. C'est au cours de ce traitement que la majeure partie de la pollution carbonée biodégradable est éliminée. Plusieurs méthodes et techniques sont utilisées, selon que les microorganismes sont fixés sur un support ou en suspension dans l'eau.[22]

Les méthodes de traitement biologique les plus fréquemment utilisées sont :

I. 8. 3. 1 Traitement par boue activée :

Ce traitement implique le contact de l'eau usée avec une biomasse épuratrice, qui constitue essentiellement un écosystème simplifié et sélectionné comprenant des micro-organismes. Cette biomasse se compose de micro-organismes vivants de petite taille, inférieure au millimètre, comprenant une microflore de bactéries et une microfaune incluant des protozoaires, entre autres.

La dégradation se produit par voie aérobie, en présence d'oxygène, où les impuretés sont transformées grâce à l'action de la biomasse. Les bactéries décomposent la matière organique, à condition de réguler adéquatement la quantité d'oxygène dissous dans l'eau par rapport à la concentration de la biomasse.

Pour favoriser le développement d'une culture bactérienne libre sous forme de flocons, l'eau à épurer est introduite dans un bassin brassé et aéré. Le brassage peut être réalisé en surface à l'aide d'une turbine, ou au fond du bassin par la diffusion de bulles d'air. Son objectif est d'éviter les dépôts et d'homogénéiser le mélange des flocons bactériens et de l'eau usée. L'aération, effectuée à partir de l'oxygène de l'air, vise à dissoudre l'oxygène dans l'eau pour répondre aux besoins des bactéries épuratrices aérobies. Le temps de contact entre l'eau usée et la biomasse est généralement de 6 à 10 heures.

Dans une simplification du traitement secondaire, une partie des boues formées est recyclée dans le bassin d'aération pour réensemencer en micro-organismes, tandis que l'excès de boues est extrait et traité.[22]

Une station de traitement à boue activée comprend généralement les éléments suivants :

- Un bassin d'aération où l'eau à épurer est en contact avec la masse bactérienne épuratrice et est continuellement oxygénée.
- Un décanteur où se réalise la séparation entre l'eau épurée et la culture bactérienne (flocs).
- Un système de recirculation qui renvoie les boues biologiques récupérées dans le décanteur vers le bassin d'aération, ainsi qu'un dispositif d'extraction pour évacuer les boues en excès.

I. 8. 3. 2 Traitement par lit bactérien :

Le fonctionnement d'un lit bactérien repose sur le ruissellement de l'eau préalablement décantée sur une masse de matériau (naturel ou plastique) servant de support aux micro-organismes épurateurs, formant ainsi un film épais. Les microorganismes fixés éliminent les matières organiques en adsorbant les constituants solubles et en suspension. Le rendement maximal de cette technique est d'environ 80 % d'élimination de la DBO₅.

Peu utilisés, les lits bactériens sont généralement réservés aux installations de taille inférieure à 2000 équivalents-habitants. [22]

I. 8. 3. 3 Traitement par bioréacteur membranaire (MBR) :

Les procédés membranaires associent des processus biologiques et physiques. Après un traitement par boues activées, l'eau passe à travers des membranes organiques ou céramiques très fines qui agissent comme une barrière physique, retenant les micro-organismes et les particules. Les bactéries demeurent dans le réacteur, généralement un bassin à boues activées, où se déroule

la réaction biologique de dégradation des matières organiques. Ce type de traitement présente l'avantage de nécessiter des installations compactes, car il élimine le besoin d'un clarificateur, et offre un niveau d'épuration très élevé. Cependant, il est peu utilisé en raison de ses coûts de fonctionnement élevés. [22]

I. 8. 3. 4 Traitement par biofiltres :

Le principe de la filtration repose sur l'utilisation d'un matériau filtrant granulaire colonisé par une biomasse épuratrice, formant un biofilm biologique autour des grains, à travers lequel l'eau à traiter passe. Les films biologiques sont minces et sont régulièrement renouvelés par des lavages. Cette technique, développée dans les années 80, permet d'éliminer environ 90 % de la DBO₅ et peut également réduire la concentration d'azote. Son avantage réside dans l'utilisation d'installations plus compactes, facilitant ainsi leur intégration dans les zones urbaines. [22]

I. 8. 3. 5 Traitement par lagunage :

Le lagunage est une méthode biologique pour épurer les eaux usées, où le traitement est réalisé par une combinaison de processus aérobies et anaérobies impliquant une diversité de micro-organismes tels que les bactéries, les algues, les protozoaires, etc. Les mécanismes d'épuration et les micro-organismes impliqués sont similaires à ceux responsables du phénomène d'autoépuration observé dans les lacs et les rivières.

Cette technique implique une série de bassins ou de lagunes peu profonds et généralement rectangulaires, à travers lesquels l'eau s'écoule gravitairement d'une lagune à l'autre. On distingue quatre types de lagunages :

- Le lagunage naturel :

Dans ce type, l'énergie solaire est la source qui alimente la production de matière vivante par les chaînes alimentaires aquatiques. L'épuration des effluents est principalement effectuée par des bactéries aérobies, avec l'oxygénation assurée par l'action chlorophyllienne des végétaux, qui contribuent également à la synthèse directe de matière organique. [22]

- Le lagunage aéré :

Contrairement au lagunage naturel, où l'oxygène est fourni par la photosynthèse et le transfert à l'interface eau-atmosphère, dans le lagunage aéré, l'oxygène est produit artificiellement à l'aide

d'aérateurs mécaniques, c'est-à-dire par insufflation d'air. Ce procédé est un compromis entre le lagunage naturel et les procédés biologiques traditionnels, comprenant des lagunes d'aération et des lagunes de décantation. [22]

- Le lagunage anaérobie :

Dans ce type de lagunage, le rendement d'épuration dépend principalement du développement d'une fermentation méthanique. Il est généralement utilisé pour des effluents à fortes concentrations et souvent comme prétraitement avant un deuxième stade d'épuration aérobie. Ce système est principalement utilisé dans les climats tropicaux. [22]

I. 8. 3. 5. 1 Le lagunage à haut rendement :

Cette technique se caractérise par une production intensive d'algues, permettant une épuration efficace des eaux usées. En plus de son utilité pour le traitement des eaux usées, le lagunage à haut rendement est également considéré comme un moyen de produire une biomasse algale pouvant avoir une valeur alimentaire, offrant ainsi une valorisation des eaux usées des zones urbaines et des industries agroalimentaires. Cette méthode présente un fort potentiel de développement biotechnologique basé sur les microalgues. [22]

I. 8. 4 Traitement tertiaire ou les traitements complémentaires :

Dans certains cas, des traitements tertiaires sont nécessaires, notamment lorsque l'eau épurée doit être rejetée dans des milieux particulièrement sensibles. Ces traitements incluent la désinfection, la dénitrification et la déphosphatation. Par exemple, les rejets dans les eaux de baignade, les lacs affectés par l'eutrophisation ou les zones d'élevage de coquillages peuvent nécessiter ce troisième niveau de traitement. Les traitements tertiaires peuvent également englober des méthodes de désinfection. De plus, la réduction des odeurs peut également être une préoccupation importante à ce stade.[38]



Figure I-2 : Modèle de station d'épuration.[39]

I. 9 L'objectif d'un centre de traitement des eaux usées est le suivant :

- Éliminer les rejets d'eau usée à l'état brut dans le milieu naturel.
- Protéger la santé publique.
- Préserver les ressources en eau conventionnelles.
- Prévenir la pollution des ressources.
- Préserver les écosystèmes aquatiques et les systèmes environnants.
- Favoriser l'économie d'eau en utilisant des ressources alternatives.
- Utiliser le débit d'eau épurée pour l'irrigation des espaces verts. [22]

CHAPITRE II

GÉNÉRALITÉS SUR LES

MICROALGUES

Chapitre II Généralités sur les microalgues :

II. 1 Les algues :

Les océans et les mers couvrent environ deux tiers de la surface de la terre. C'est là que vivent les plantes photosynthétiques appelées "algues", jusqu'à une profondeur d'environ 150 m, en fonction de la transparence de l'eau. Les algues se trouvent sur les rivages et les côtes, attachées au sol (espèces benthiques), ou vivent en suspension dans l'eau elle-même (espèces planctoniques). Les eaux douces sont également peuplées de nombreuses espèces d'algues et il existe également des formes terrestres, sur les sols et parmi les bryophytes, bien qu'elles soient pour la plupart discrètes et facilement négligeables. Au total, les algues représentent probablement plus de la moitié de la production primaire totale dans le monde ; pratiquement tous les organismes aquatiques dépendent de cette production[40]

Les algues regroupent un ensemble de végétaux photosynthétiques très divers et dont l'appareil végétatif relativement simple est appelé « thalle », elles ont des formes et des dimensions très variables. Certaines sont microscopiques et d'autres mesurent plusieurs mètres de longueur, mais elles ont toutes des caractères communs. Elles sont essentiellement aquatiques dans les eaux douces ou marines, et certaines vivent sur la neige ou la glace des régions polaires et des hautes montagnes. D'autres au contraire supportent dans les eaux des sources thermales des températures élevées (algues thermophiles). Elles comprennent 20 000 à 30 000 espèces dans le monde, soit 18% du règne végétal[41]

II. 2 Les micro-algues :

II. 2. 1 Définition et Origine des micro-algues:

Les micro-algues sont des organismes microscopiques unicellulaires photosynthétiques qui se développent dans les milieux fortement aqueux et sont capables de convertir l'énergie lumineuse et une source de carbone (CO_2) en un ensemble de produits organiques. On utilise le terme «micro» car la taille d'une micro-algue varie de quelques micromètres à une centaine de micromètres. L'existence des micro-algues et plus précisément des cyanobactéries remontent à plus de trois milliards d'années. En utilisant l'énergie solaire, elles produisirent de l'oxygène qui s'accumula lentement dans l'atmosphère primitive, atmosphère hostile riche en gaz carbonique et en méthane. L'enrichissement en oxygène de l'atmosphère primitive conduisit à la création de la couche d'ozone, qui protège la Terre des rayonnements solaires ultraviolets, et provoqua des modifications

du climat et de la composition de la croûte terrestre. Ces changements ont ainsi permis une colonisation des continents par de nouvelles formes de vie animale et végétale

II. 2. 2 Caractéristiques des micro-algues :

La majorité des micro-algues sont dites photo-autotrophes ou autotrophes. Elles tirent leur énergie de la lumière par photosynthèse et leur principale source nutritive est le CO₂ en solution dans l'eau. Leur relative simplicité et la petitesse de leur taille permettent d'effectuer une photosynthèse très efficace. Elles convertissent ainsi l'énergie lumineuse en lipides et en hydrates de carbone, des formes plus condensées et stables d'énergie. Comme chez les végétaux terrestres, certaines espèces de micro-algues peuvent accumuler, dans certaines conditions de culture, le carbone fixé, sous forme de lipides appelés triglycérides. Les lipides stockés constituent alors une réserve de carbone pour la micro-algue[42] Cependant, certaines espèces sont capables d'accumuler jusqu'à 80 % de leur poids sec en lipides[43]

Cependant, certaines espèces de micro-algues sont capables de se développer en absence de lumière ; elles sont dites hétérotrophes. Dans ce cas elles se développent en mode fermé dans des bioréacteurs semblables à des fermenteurs et se nourrissent d'une source de carbone organique[44]

II. 2. 3 Une diversité d'espèces :

Ces micro-organismes constituent un groupe très diversifié, dans lequel nous retrouvons des espèces procaryotes (micro-algues bleues ou cyanobactéries) et eucaryotes (micro-algues vertes, rouges et brunes). Les micro-algues eucaryotes possèdent une structure cellulaire végétale classique compartimentée, avec ou sans paroi cellulosique, et avec des pigments photosynthétiques renfermés dans les chloroplastes. Les micro-algues procaryotes ont une structure bactérienne classique sans compartiment, les pigments photosynthétiques sont contenus dans des membranes lamellaires. D'un point de vue taxonomique, le classement des micro-algues se fait sur la diversité de leurs propriétés et notamment leurs caractéristiques morphologiques, la pigmentation ou encore l'organisation des membranes[45]. Il est cependant plus simple de les distinguer selon deux groupes [42]:

II. 2. 3. 1 Les procaryotes :

Ce sont des organismes unicellulaires qui sont dépourvus de noyau et ne présentent que très rarement des organites cellulaires.

II. 2. 3. 2 Les Eucaryotes :

Ce sont des organismes uni ou pluricellulaires qui présentent une structure complexe contenant un noyau entouré d'une membrane ainsi que plusieurs organites intracellulaires : chloroplastes, amyloplastes, oléoplastes, ... (

Figure I-1).....

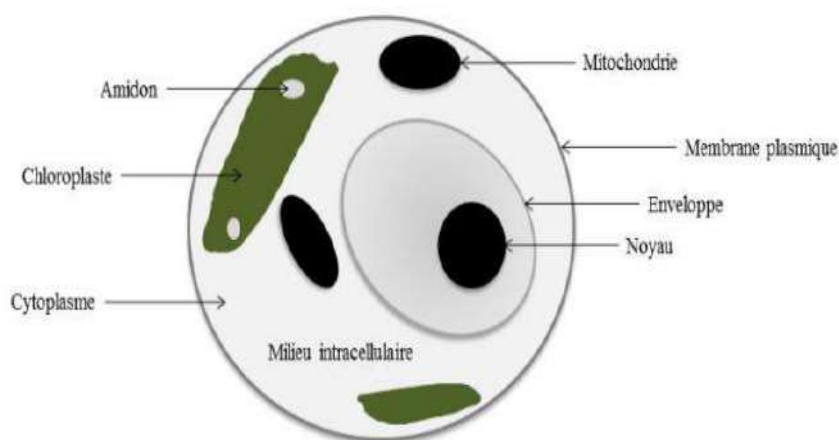


Figure II-1:Schéma d'une structure de micro-algue unicellulaire[42]

II. 2. 4 Classification des microalgues :

Le terme algue regroupe des individus chlorophylliens vivant essentiellement dans l'eau et qui ne sont pas des embryophytes et sont très rarement regroupées en fonction de leur métabolisme énergétique ou encore en fonction de leur habilité à synthétiser les métabolites nécessaires, mais plutôt en fonction de leurs propriétés morphologiques. Il existe donc plusieurs classifications taxonomiques différentes de microalgues, mais elles peuvent être réparties dans sept embranchements, dont les principales sont les cyanophycées, les chrysophycées, les rhodophycées, les euglenophycées, les chlorophycées, les charophycées et les phacophycées.[46]

II. 2. 4. 1 Les Cyanophycées (algues bleues-vertes) :

Les cyanophycées ou algues bleues-vertes sont des algues procaryotes très répandues ne possédant aucun noyau dont environ 7 500 espèces sont connues à ce jour. Elles sont habituellement de petites tailles, soit 10 μm ou moins, et peuvent être retrouvées dans pratiquement tous les habitats (eaux fraîches, eaux salées, eaux saumâtres et sols) étant donné leur aptitude à

résister à des températures extrêmes et leur résistance à la dessiccation (**Figure II-2**). Cependant, la majorité des algues bleues-vertes ont des températures optimales de croissance de 32 à 35°C. La principale restriction des cyanophycées provient du fait que ces dernières nécessitent la présence de lumière pour leur croissance et sont donc principalement des organismes autotrophes obligatoires. Certaines espèces seraient toutefois en mesure d'oxyder certains sucres en absence de lumière. Les cyanophycées emmagasinent principalement leur énergie sous forme d'amidon (amylose et amylopectine) ou encore sous forme d'huiles. [47]



Figure II-2: Photographie d'une cyanophycée Nostoc ou Crachat[47]

II. 2. 4. 2 Les Rhodophycées (algues rouges) :

Il existe près de 4 000 espèces d'algues rouges qui sont retrouvées dans les eaux saumâtres et salées et très rarement dans les eaux douces (**Figure II-3**). Comme les phacophycées, cette classe ne comprend aucune algue de métabolisme hétérotrophe et la plupart d'entre elles sont photoautotrophes ou photo organotrophes.[47]



Figure II-3: Photographie d'une rhodophycée Stylonema Alsiddii[47]

II. 2. 4. 3 Les Chrysophycées (algues dorées) :

Les chrysophycées ou algues dorées sont généralement présentes dans les eaux douces (**Figure II-4**). Cette classe est représentée par 150 genres et environ 800 espèces. Le mode de nutrition de ces algues est très varié, mais certaines d'entre elles possèdent un mode de nutrition hétérotrophe comme « *Ochromonas danica* » qui comprend un pourcentage de 27,4 % en acides gras et dont la source de carbone assimilée est le glucose.[47]



Figure II-4: Les Chrysophycées (algues dorées) [47]

II. 2. 4. 4 Les chlorophycées (algues vertes) :

Les chlorophycées sont retrouvées dans tous types d'habitat. L'amidon et l'huile constituent leurs principales réserves énergétiques. Parmi les microalgues de ce groupe, celles ayant un métabolisme photoautotrophe, photohétérotrophe ou chemohétérotrophe. L'espèce la plus étudiée possédant un métabolisme chemohétérotrophe est *Chlorella vulgaris*. Cette espèce est très intéressante pour la production de biodiesel en raison de son pourcentage intéressant en acides gras. Les principales sources de carbone assimilables le sont sous forme de sucres et d'acide acétique. D'autres espèces faisant partie de cette classe ont un potentiel intéressant en huile pour la production d'algocarburants dont notamment l'espèce *Chlorella protothecoides* (**Figure II-5**).[47]



Figure II-5: Les chlorophycées (algues vertes) [47]

II. 2. 5 Autres types de microalgues :

II. 2. 5. 1 Les Euglenophycées :

Il existe plus de 800 espèces d'euglenophycées qui sont retrouvées généralement dans les eaux saumâtres et douces (**Figure II-6**). Les principales réserves de ces algues sont constituées de paralysons, une substance glucidique, et d'huiles. Les études réalisées à partir des euglenophycées démontrent que celles-ci possèdent une nutrition complexe et qu'il est difficile de définir des besoins nutritionnels communs pour plusieurs espèces. Une espèce en particulier, *Euglena gracilis*, peut croître en mode autotrophe et hétérotrophe.[47]



Figure II-6: Les Euglenophycées[47]

II. 2. 5. 2 Les bacillariophycées (diatomées) :

Les diatomées (les phacophycées) représentent souvent le groupe dominant de microalgues parmi les populations de phytoplancton et sont extrêmement répandues dans tous les types d'habitat (**Figure II 7**). En effet, plus de 100 000 espèces sont connues et il en existerait plus d'un million. Celles-ci sont unicellulaires et mesurent de 2 μm à 1 mm.

Les diatomées emmagasinent leurs réserves sous forme de chrysolaminaran, un polysaccharide, ainsi que d'huiles. Elles sont d'ailleurs reconnues pour leur contenu en acides gras et pendant plusieurs années, Les scientifiques croyaient que les lipides représentaient le seul composé de réserve. Parmi les espèces de diatomées, plusieurs possèdent un métabolisme hétérotrophe obligatoire ou encore facultatif (principalement les diatomées pennales), alors que certaines autres possèdent plutôt un métabolisme photohétérotrophe (principalement les diatomées centriques).

Les diatomées possédant un métabolisme hétérotrophe ou encore mixotrophe sont très diversifiées quant au taux d'assimilation des hydrates de carbone ainsi qu'au type d'hydrate de carbone utilisé.

[46]

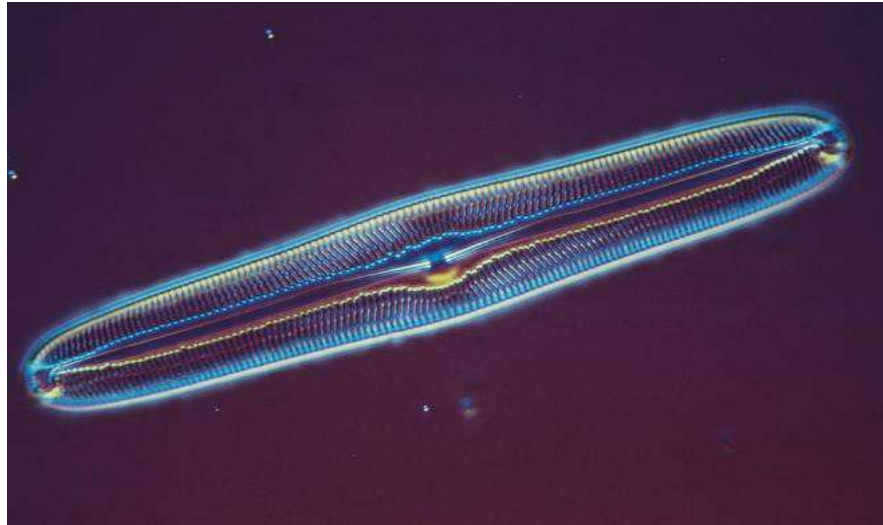


Figure II-7: Les bacillariophycées (diatomées) [46]

Les microalgues constituent un groupe important de micro-organismes qui prospèrent dans les milieux aquatiques. Les microalgues sont divisées en plusieurs groupes principaux, notamment les diatomées, les algues vertes et les algues bleu-vert (cyanobactéries) et autres, chacune possédant ses propres propriétés uniques et ses effets biologiques importants dans de nombreuses applications industrielles, médicales et alimentaires (**Figure II-8**).

Chapitre II Généralités sur les microalgues

Tableau II-1: Résumé des groupements majeurs des algues selon les botanistes [48]

Phylum	Nom Commun et Espèces	Pigments	Caractéristiques
Cyanophyte	Algues bleues-vertes Spirulina, Anabaena	bleu-vert: phycocyanine, phycoérythrine, chlorophylle a et b	Multicellulaire ou unicellulaire mais habituellement microscopique.
Euglenophyte	Euglenoïde Euglena	Vert	Unicellulaire, mobile, sans membrane cellulaire.
Chlorophyte	Algues vertes Chlorella, Scenedesmus	Vert: chlorophylle a et b.	Unicellulaire, multicellulaire, quelquesunes microscopiques, membrane cellulaire formée de cellulose et de pectine.
Chrysophyte	Algues jaunes-vertes ou brunes claires Diatomées	Jaune - vert, brun clair: xanthophylle, carotènes et chlorophylle.	Microscopique, unicellulaire, leur membrane cellulaire contient de la silice.
Pyrophyte	Dinoflagellés, Peredinium, Massartia	jaune-vert, brun foncé: Xanthophylle, chlorophylle a et c.	Unicellulaire, mobile, membrane cellulaire en cellulose.
Phaeophyte	Algues brunes Fucus	Vert d'Olive, brun foncé: fucoxanthine, xanthophylle, chlorophylle a et c.	Multicellulaires principalement, vivent dans les eaux marines, leur membrane cellulaire est formée en pectine et en cellulose
Rhodophyte	Algues rouges Polysiphonia	Rouge: phycocyanine, phycoérythrine et chlorophylle a	La plupart sont multicellulaires, vivent dans les eaux marines et possèdent une membrane en cellulose et en pectine

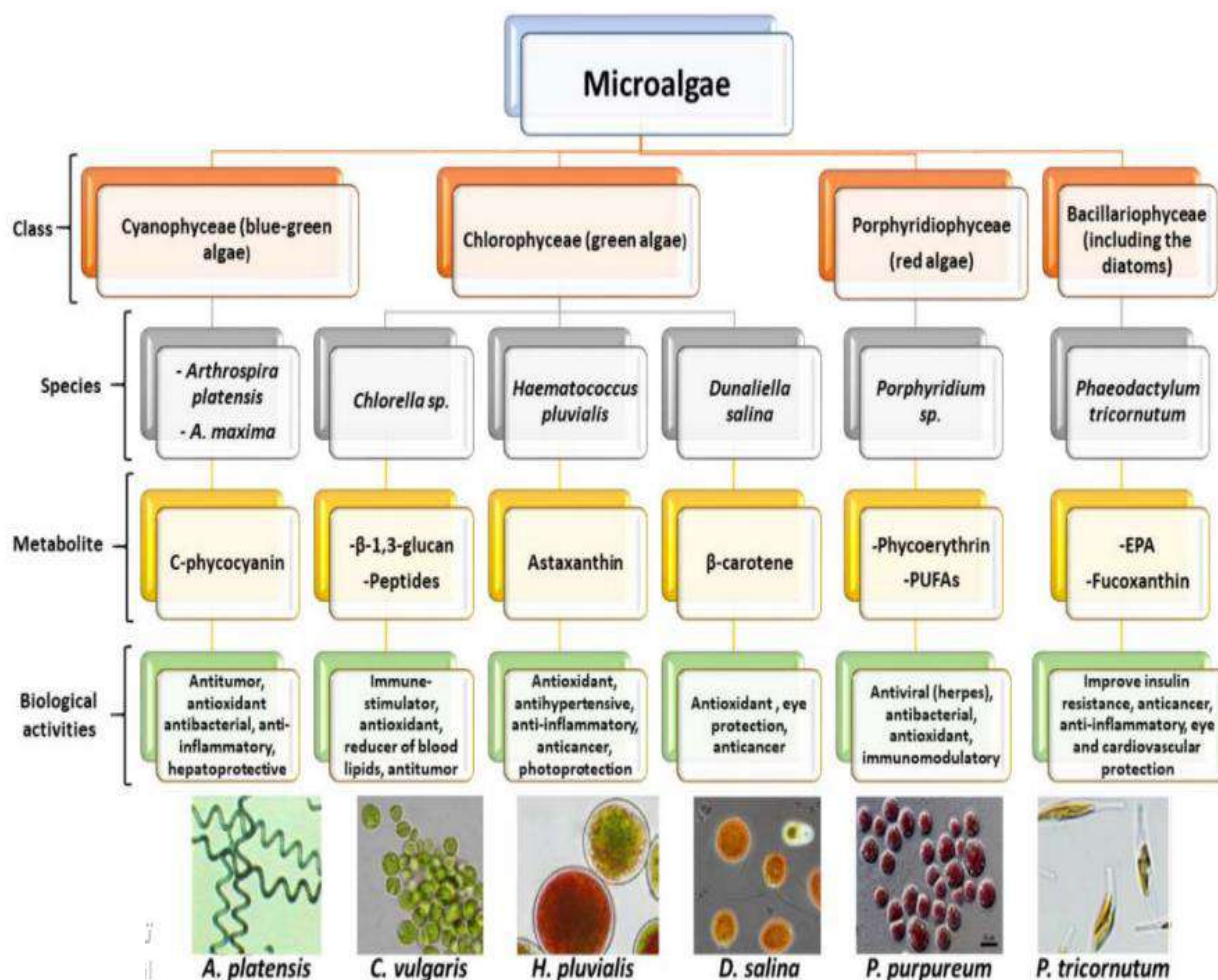
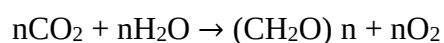


Figure II-8: Principales classes de microalgues, leurs espèces les plus importantes et leur activité biologique associée .[49]

II. 2. 6 La photosynthèse :

La photosynthèse est réalisée par des réactions qui transforment l'énergie solaire, le dioxyde de carbone et l'eau en biomasse et oxygène. Les pigments récoltent la lumière et les réactions chimiques sont effectuées par des enzymes. L'efficacité photosynthétique est définie comme le rapport entre la biomasse produite et l'intensité lumineuse. Organites et molécules de la photosynthèse les cellules photosynthétiques possèdent des chloroplastes, qui sont les organites dans lesquels se déroule la réaction de la photosynthèse[50]. Ce sont dans les chloroplastes que se déroule la réaction de photosynthèse. Ce mécanisme consiste en une réaction d'oxydoréduction catalysée par l'énergie lumineuse et qui convertit le dioxyde de carbone et l'eau en sucre simples et en oxygène.[51]



II. 2. 7 Les phases de photosynthèse :

La réaction de photosynthèse des microalgues comprend des phase lumineuse et phase obscure.[51]

II. 2. 7. 1 Phase lumineuse :

Cette réaction rapide est réalisée dans la membrane du chloroplaste. elle permet la conversion de l'énergie lumineuse en énergie chimique pour produire du NADPH_2 et de l'ATP. L'oxygène libéré résulte de la dissociation de la molécule d'eau consommée. Cette réaction est particulièrement rapide.

II. 2. 7. 2 Phase « obscure » ou sombre :

Le siège de la réaction est situé dans le stroma (**Figure II-9**) où les produits de la phase claire vont participer à la réduction du CO_2 en glucides. Cette étape est significativement plus lente que la précédente. Cette réaction globale se réalise en deux étapes (phase lumineuse et phase obscure) séparées dans l'espace et dans le temps.

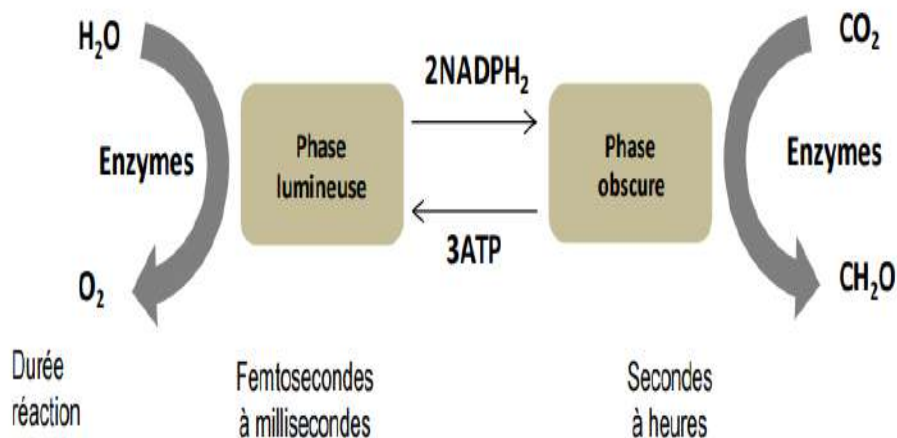


Figure II-9: Phases lumineuse et obscure de la réaction de photosynthèse.[51]

II. 2. 8 Le chloroplaste :

Chez les eucaryotes photosynthétiques, la photosynthèse a lieu dans le chloroplaste, un organite qui est présent dans tous les tissus verts de ces organismes. Le chloroplaste est compartimenté en une série de domaines spécialisés par un réseau complexe de membranes. L'organite est entouré d'un système à double membrane appelé enveloppe ; l'extérieur L'enveloppe est hautement perméable et permet la libre diffusion des molécules entre le cytoplasme et le compartiment inter-membranaire. L'enveloppe intérieure sépare physiquement la partie interne du chloroplaste du

cytoplasme et il contient des transporteurs spécifiques pour réguler l'échange de métabolites entre les deux compartiments. Deux événements importants au niveau de l'enveloppe sont l'importation de protéines dans le chloroplaste, puisque le génome chloroplastique ne code qu'une partie mineure des protéines nécessaires aux fonctions des chloroplastes et à l'exportation de triose-phosphates du chloroplaste au cytoplasme, où ils sont convertis en saccharose et finalement exporté vers d'autres tissus végétaux (**Figure II-10**).[52]

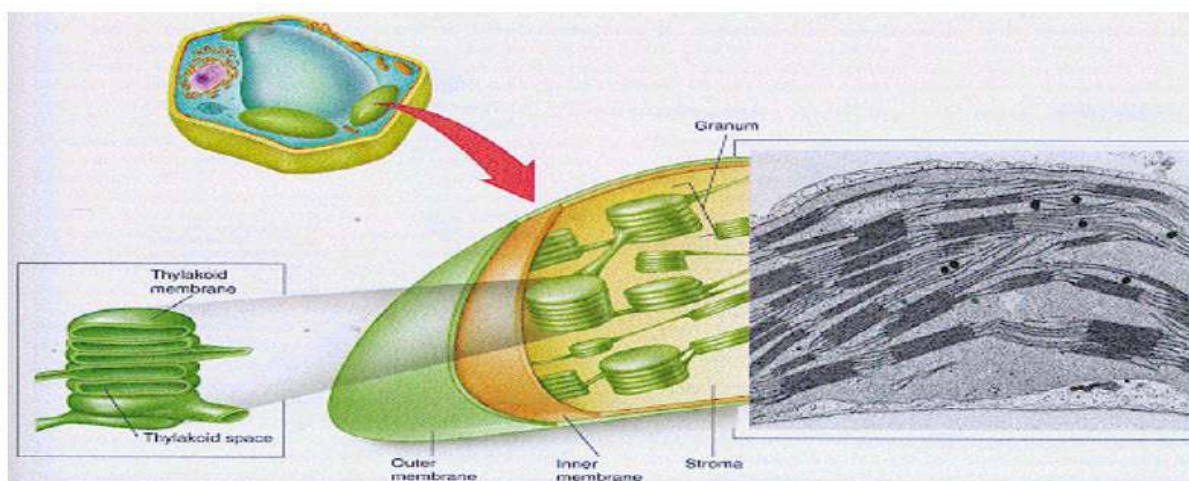


Figure II-10: représentation du chloroplaste et de ses structures internes : il est possible de noter l'enveloppe interne et externe et le réseau des thylakoïdes. A droite, une image au microscope électronique image d'un chloroplaste.[52]

II. 2. 8. 1 Les thylakoïdes :

Les thylakoïdes empilés en grana au sein desquels a lieu la photosynthèse. Les thylakoïdes constituent ainsi un ensemble de membranes. On parle aussi de membranes thylakoïdes qui sont des structures en double couche lipidique et dont la membrane intérieure délimite un espace (dit thylakoïdal) aqueux appelé le lumen.[53]

II. 2. 8. 2 Chlorophylles :

Les chlorophylles sont des molécules à structure cyclique, comportant un atome central de magnésium et quatre cycles pyrroles, d'où leur appellation de molécules tétrapyrroliques où chaque cycle pyrrole est formé de quatre atomes de carbone et d'un atome d'azote. Elles jouent un rôle de premier plan dans la photosynthèse.

La plupart des chlorophylles, tant en termes de quantité que de diversité structurale, servent à collecter la lumière.[54]

II. 2. 8. 3 Types de chlorophylle :

Les types de chlorophylle présents dans les microalgues varient en fonction du type d'algue et des conditions de l'environnement dans lequel elle vit (**Figure II-11**). Cette diversité contribue à faire de chaque type de plante ou microalgue une caractéristique et un environnement qui lui est adapté.

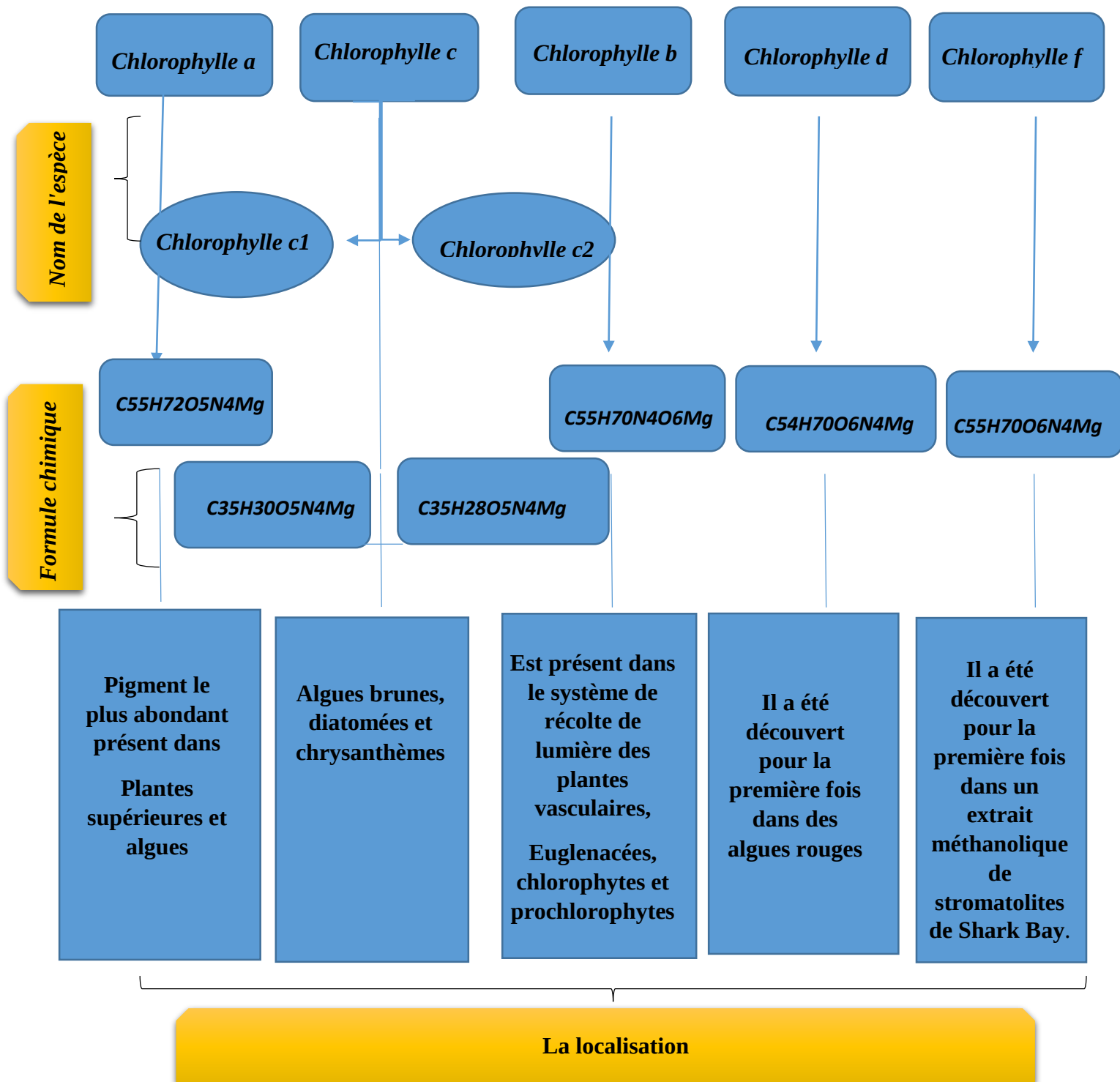


Figure II-11 : Illustrations des types de chlorophylle

II. 2. 9 Reproduction des microalgues :

Tous les organismes vivants passent par divers stades de vie, plus ou moins différents, avant de revenir à leur état initial. Ce processus est appelé cycle de vie, en raison de son caractère cyclique ou répétitif. Le cycle de vie des micro-algues qui comprend généralement des processus de reproduction sexuée et/ou asexuée. [55]

II. 2. 9. 1 Reproduction asexuée :

La prolifération micro-algale s'effectue principalement par une reproduction asexuée ou multiplication végétative : une cellule mère se divise alors en deux cellules filles génétiquement identiques, ce mode de reproduction peut être divisé en trois types

- Fragmentation du thalle
- Sporulation
- Scission binaire

II. 2. 9. 2 Reproduction sexuée :

Ce mode est le moins fréquent et le plus aléatoire, généralement déclenchée par des conditions environnementales particulières souvent multifactorielles. Au cours de ce mode de reproduction les gamètes mâle et femelle fusionnent pour produire un zygote diploïde. [56]

CHAPITRE III
MÉTHODES DE CULTURE
DES MICROALGUES
POUR LE TRAITEMENT
DES EAUX USÉES

Chapitre III Méthodes de culture des microalgues pour le traitement des eaux usées

III. 1 Principales techniques de culture des microalgues :

III. 1. 1 La culture des microalgues :

La culture des microalgues utilisant la lumière du soleil peut être effectuée soit dans des bassins à ciel ouvert ou des photobioréacteurs en forme de tube, rectangle, réacteur à agitation continue ou autre forme. Concernant la nutrition, la plupart des microalgues sont photo autotrophes, c'est-à-dire elles utilisent le CO₂ et qu'elles tirent leur énergie de la photosynthèse. Or, il existe aussi des micro algues hétérotrophes qui sont capables de se développer sans utiliser l'énergie solaire, mais une source de carbone organique , c'est le cas de *Chlorella vulgaris* et *Chlorella protothecoides*. [57]

III. 1. 2 Récolte et séchage

III. 1. 2. 1 Récolte :

Les méthodes de récolte varient et l'une des méthodes les plus efficaces pour récolter les microalgues est la technique de centrifugation.

Centrifugation C'est la méthode de récolte qui implique une accélération centripète pour séparer la culture d'algues en régions de plus et de moins grande densité, après quoi les algues et l'eau sont séparées en drainant l'excès de milieu. La centrifugation peut également être suivie d'une sédimentation pour séparer le surnageant. [58]

La centrifugation est efficace pour récolter les algues avec une récupération supérieure à 90% et la récupération dépend directement du débit d'écoulement. [59]

III. 1. 2. 2 Séchage :

Après la récolte, différentes méthodes sont utilisées pour sécher les microalgues comme la lyophilisation [60] le séchage par pulvérisation [61], et le séchage par évaporation . [62]

III. 1. 3 Exigences du milieu de culture pour la croissance:

III. 1. 3. 1 Nutriments :

Les nutriments sont des composés organiques ou inorganiques, à l'exception du dioxyde de carbone et de l'eau, qui sont utilisés pour la croissance. Les milieux utilisés dans la culture des microalgues doivent contenir des quantités suffisantes de nutriments dans des proportions adaptées à leur bonne croissance. Les besoins nutritionnels minimaux peuvent être estimés à l'aide de la formule moléculaire approximative de la biomasse de microalgues, c'est($\text{CO}_{0.48} \text{H}_{1.83} \text{N}_{0.11} \text{P}_{0.01}$.) Initialement, les milieux de culture de microalgues étaient un milieu d'eau biphasique du sol. Cependant, la composition chimique du milieu n'est pas correctement définie. Par conséquent, d'autres milieux de culture de microalgues ont été créés, contenant une source de carbone (organique ou inorganique), une source d'azote, d'oligo-éléments et d'agents chélatés, de vitamines, ainsi que la teneur en sel et autres composants ioniques (potassium, magnésium, sodium, sulfate, phosphate) en fonction de la structure cellulaire.[63]

III. 1. 3. 2 Lumière :

Comme les plantes, les microalgues ont besoin de lumière comme principale source d'énergie pour effectuer la fixation du CO_2 dans la matière organique lors de la photosynthèse. Pour une photosynthèse correcte, trois variables lumineuses importantes telles que l'intensité, la qualité spectrale et la photopériode (période lumière/obscurité). La source de lumière pour la croissance des microalgues peut être naturelle (lumière du soleil) ou artificielle fournie par des tubes fluorescents. Une intensité lumineuse trop élevée (trop) conduit à la photosynthèse qui entraîne une diminution des pigments photosynthétiques. Bien que la gamme de rayonnement solaire soit assez large, le rayonnement ne peut être utilisé qu'entre 400 et 700 nm par les microalgues. Cette partie du spectre solaire est appelée « rayonnement photoactif (PARS) » et représente 43 % du rayonnement solaire.[63]

III. 1. 3. 3 La température:

La température optimale pour la culture du phytoplancton se situe généralement entre 20 et 24 °C. En outre, la plage de température varie en fonction de la composition du milieu de culture et de l'organisme cultivé. [63]

III. 1. 3. 4 Salinité :

La concentration totale en sel dépend principalement de l'origine écologique de l'organisme. Les changements de salinité affectent normalement les microalgues de trois manières : le stress osmotique, les ions stress et les changements de concentration d'ions cellulaires dus à la perméabilité sélective des ion à travers la membrane. Les microalgues marines sont extrêmement tolérantes aux changements de salinité. La plupart des organismes se développent mieux à une salinité légèrement inférieure à celle-ci de leur habitat naturel. Des salinités de 2,0 à 2,5 ‰ se sont avérées optimales pour microalgues.[63]

III. 1. 3. 5 Le pH :

La plupart des microalgues se développent dans une plage de pH de 7 à 9, tandis que la plage optimale est de 8,2 à 8,7. Au fur et à mesure que la culture se développe, le pH du milieu de culture augmente avec le temps en raison de la consommation continue de CO₂. Si le pH n'est pas maintenu dans la plage de pH optimale, cela peut entraîner une perturbation de nombreux processus cellulaires, entraînant l'inhibition de la croissance de la biomasse. Le pH de la culture en culture peut être maintenu soit par simple aération, soit par ajout de CO₂ supplémentaire.[63]

III. 1. 4 Les modes de culture :

III. 1. 4. 1 Les systèmes ouverts:

Tels que les réservoirs, les étangs et les sont les systèmes extérieurs les plus courants et les plus commercialisés. Ces systèmes sont simples à construire, faciles à gérer et pour leur faible consommation d'énergie. Habituellement, la profondeur de l'eau dans Le système est maintenue dans une plage de 0,2 à 0,4 m pour permettre à la lumière de pénétrer. Étant donné que les systèmes ouverts sont exposés à des conditions environnementales extérieures, les cultures sont sujettes à la contamination et aux changements dans la composition du milieu de culture en raison de la dilution des nutriments (en raison des précipitations ou des pluie) ou la concentration (à cause de l'évaporation), ce qui réduit la productivité.[64]



Figure III-1: Photographie aérienne des bassins de culture d'Earthrise Nutritionals.[65]

III. 1. 4. 2 Les Systèmes fermés:

Un photobioréacteur peut être décrit comme un système clos et éclairé. C'est un récipient de culture destiné à la production contrôlée de la biomasse. Un Photobioréacteur se réfère à des systèmes qui sont fermés à l'environnement et par conséquent n'ayant aucun échange direct de gaz et de contaminants avec le milieu.[66]

Il existe plusieurs types de systèmes de photobioréacteur fermés, tels que le type à plaque plate, le type tubulaire et le type de photobioréacteur à colonne, qui sont plus productifs et pratiques pour la culture d'algues, en raison de leur efficacité à contrôler de manière significative les conditions de l'environnement environnant, telles que la température, le pH et la concentration de CO₂, et à réduire davantage les risques de contamination .[67]

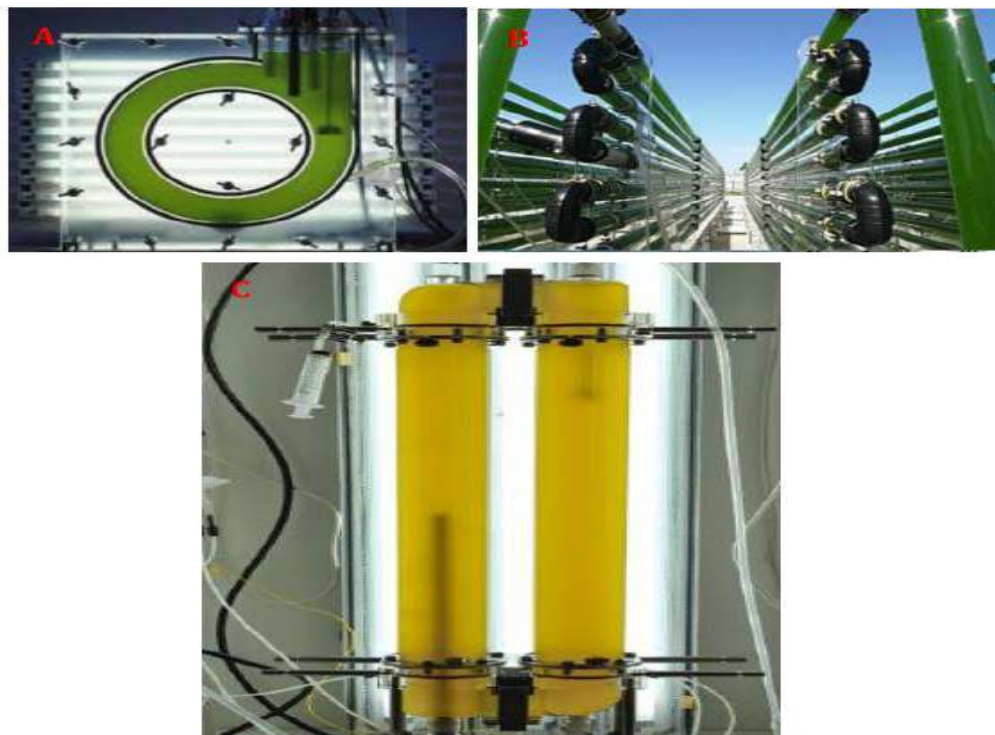


Figure III-2: systèmes fermés de culture de microalgues. A= Photobioréacteur plat du laboratoire de Physiologie et de Biotechnologie des Algues de l'Ifremer, , B= Photobioréacteur tubulaire d'un volume de 1000L en Australie. C= Photobioréacteurs de l'Algaeparc aux Pays Bas. [66]

III. 1. 4. 3 Les Systèmes hybrides:

Les systèmes de culture de microalgues peuvent être combinés afin d'optimiser le processus de production ; par conséquent, la majorité des biusines de microalgues travaillent avec des systèmes dits hybrides). Ces systèmes combinent principalement différents types de systèmes de culture, améliorant la performance globale du produit, combinant également deux stades de croissance Dans la première étape de la culture se déroule dans un photobioréacteurs où les conditions sont contrôlées pour minimiser la contamination par les microorganismes La deuxième étape consiste à faire pousser la culture dans un bassin ouvert où les cellules sont exposées à un certain stress nutritionnel afin d'augmenter la synthèse d'un métabolite spécifique (lipide, protéine ou carbohydate).[68]

III. 1. 5 Les conditions de culture :

Les microalgues peuvent se développer dans différentes conditions selon les sources d'énergie et de carbone utilisés. Le **Tableau III-1** rapporte une comparaison entre les conditions de la croissance des microalgues basées sur le type de source d'énergie et de carbone.[69]

Tableau III-1: Conditions de culture des microalgues[69]

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

- **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.[70]

- **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.[69]

- **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[71]

III. 2 Mécanismes de traitement des eaux usées par les microalgues :

Le mécanisme de traitement des eaux usées à l'aide de microalgues dépend de la capacité de ces micro-organismes à consommer et transformer les polluants présents dans l'eau. Lors de la culture d'algues dans un environnement d'eaux usées

III. 2. 1 Assainissement de l'environnement par l'utilisation de microalgues :

La dépollution de l'environnement à l'aide de microalgues dépend de trois mécanismes **Figure III-3** qui sont :

III. 2. 1. 1 Biosorption :

La paroi cellulaire des microalgues est directement responsable de la biosorption, et sa composition chimique joue un rôle essentiel au cours du processus et détermine le mécanisme par lequel ce phénomène se produit. De plus, des pores existent à la surface des microalgues et la charge de surface améliore la biosorption. Divers groupes chimiques présents dans la paroi cellulaire des microalgues, tels que le carboxyle, l'hydroxyle et le sulfate, agissent comme des sites de liaison et sont également des échangeurs d'ions efficaces qui contribuent à la formation d'ions métalliques et à l'adsorption de matière organique provenant de l'eau polluée.[72]

III. 2. 1. 2 Bioaccumulation :

Contrairement à la biosorption, la bioaccumulation est un processus métabolique actif décrit comme l'utilisation de divers substrats dans la lumière cellulaire. La bioaccumulation nécessite de l'énergie et est raisonnablement plus lente que la biosorption. Grâce à la bioaccumulation, les cellules vivantes sont utilisées pour détoxifier les déchets ; ils absorbent des substances et les accumulent ou les métabolisent. Ce processus est considéré comme une voie essentielle pour éliminer les polluants inorganiques et organiques (c'est-à-dire les sulfates, les nitrates, les phosphates, les métaux lourds et les pesticides) dans lesquels ces substances peuvent être transférées à l'intérieur des cellules.[73]

III. 2. 1. 3 Biodégradation :

La biodégradation est l'un des processus les plus efficaces pour éliminer les polluants des effluents, où les composés complexes se décomposent en éléments chimiques simples et sûrs. Contrairement à la bioaccumulation et à la bioadsorption, qui impliquent des micro-organismes qui agissent comme des filtres biologiques pour concentrer les polluants et les séparer de l'eau environnante, la bioremédiation implique la décomposition des polluants cibles soit par la minéralisation complète des molécules mères en CO₂ et H₂O, soit par biotransformation, qui contient une série de réactions enzymatiques pour produire différents milieux métaboliques.[74]

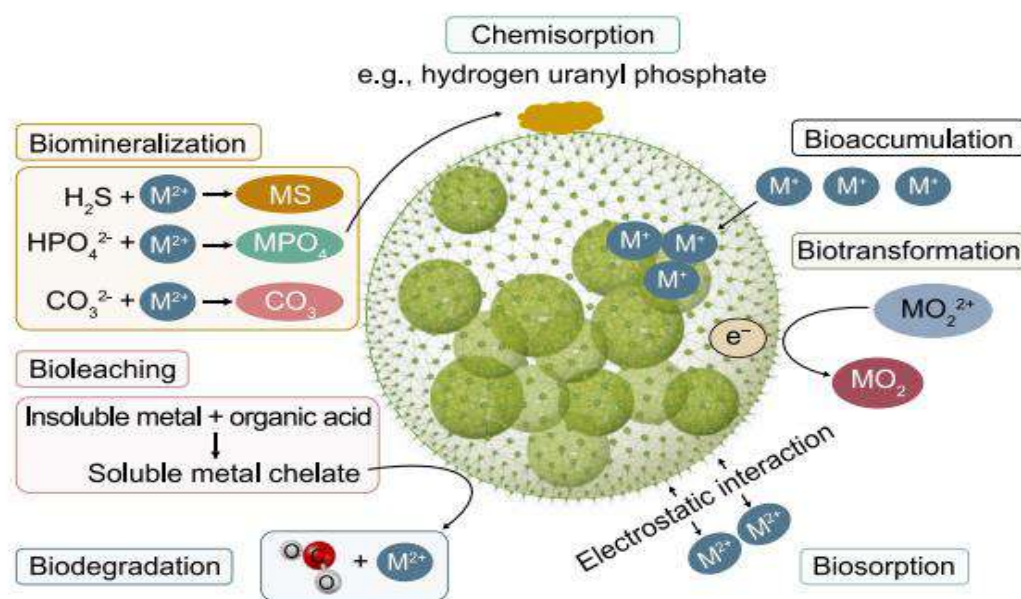


Figure III-3: Mécanisme d'interactions métal-microbe au cours du processus de bioremédiation.[75]

III. 2. 2 Co-culture de microalgues pour le traitement des eaux usées :

La culture de microalgues dans les eaux usées est une technologie complexe qui implique différents types de réactions, dont nous présentons ci-dessous quelques-unes :

III. 2. 2. 1 Interaction algue-bactérie :

En tant que technologie en développement pour l'élimination des polluants, le consortium de microalgues se distingue par ses taux élevés d'élimination des polluants, son potentiel élevé de récupération des ressources. Les algues et les bactéries ont coexisté historiquement, et leurs interactions environnementales consistent en trois types : l'échange de nutriments, la transduction du signal et le transfert de gènes (**Figure III-4**) Ces interactions se traduisent par trois relations symbiotiques ou antagonistes entre les algues et les bactéries : la symbiose réciproque, la symbiose et l'antagonisme. En général, la symbiose réciproque entre les algues et les bactéries est caractérisée par le fait que les microalgues fournissent de l'oxygène, du carbone et un habitat pour la croissance bactérienne, tandis que les bactéries fournissent du dioxyde de carbone, de l'azote, de la vitamine B12, des hormones végétales et des sidérophores pour la croissance des microalgues.[74]

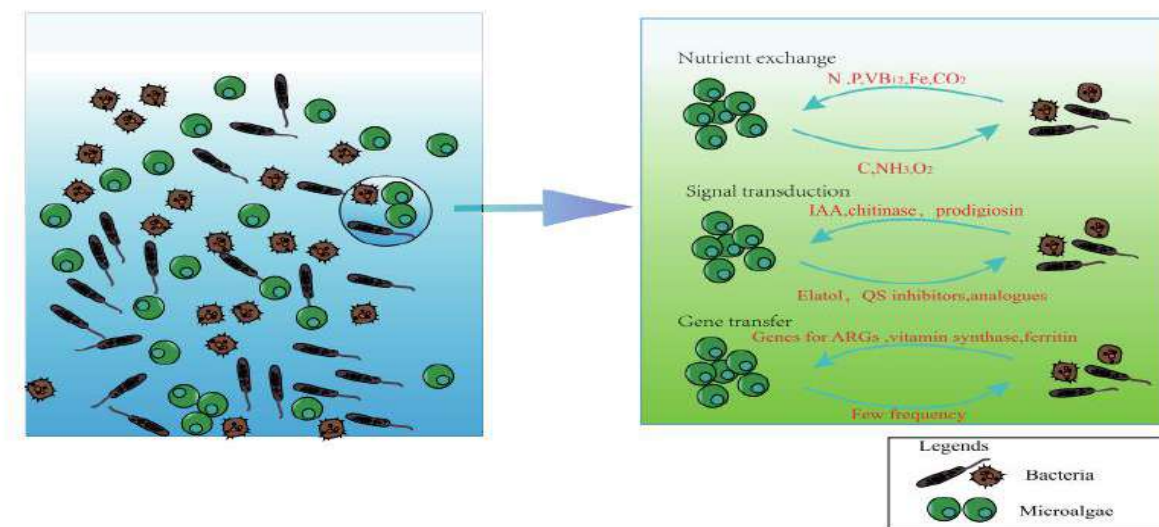


Figure III-4: Interaction des consortiums algues-bactéries. [74]

III. 2. 2. 2 Boues activées par les microalgues :

La supériorité de l'association des boues activées par les microalgues dans les stations d'épuration des eaux usées émanait de l'assimilation des nutriments par les microalgues et de l'amélioration de l'élimination de la DCO par les boues activées, surpassant les mono-systèmes conventionnels. Le rapport boues/microalgues dépend des caractéristiques du traitement de l'eau et de sa composition.[75]

III. 2. 2. 3 Microalgues-nanoparticules :

Avec de nombreux avantages de rapport surface/volume, de porosité et de biocompatibilité élevés, les nanofibres qualifiées sont considérées comme des supports idéaux par rapport aux autres matériaux de support conventionnels pour l'immobilisation et l'encapsulation de micro-organismes, y compris les microalgues, afin de produire des matériaux hybrides bio-intégrés avec une plus grande efficacité d'élimination des polluants, une facilité d'application et une réutilisation.[76]

III. 2. 2. 4 Microalgues-bactéries :

Plusieurs études se sont également penchées sur la culture de microalgues avec des champignons et leur rôle symbiotique dans la bioremédiation des eaux usées. La réaction synergique entre les microalgues et les champignons/levures est raccourcie par la génération d' O_2 par les microalgues pour la synthèse de la biomasse. La levure utilise ensuite l'oxygène pour la

Chapitre IV Méthodes de culture des microalgues pour le traitement des eaux usées

respiration cellulaire, ce qui entraîne la dégradation de la matière carbonée, libérant le dioxyde de carbone nécessaire aux microalgues pour la photosynthèse.[77]

III. 3 Avantages et limites de l'utilisation des microalgues dans le traitement des eaux usées :

Chaque technologie de traitement présente des avantages et des inconvénients. **Tableau III-2** Les avantages et inconvénients de l'utilisation des microalgues dans le traitement de l'eau sont les suivants :

Tableau III-2: les avantages et les inconvénients du traitement aux microalgues

Avantages	Inconvénients
- processus biologiques et systèmes de boues activées) nécessitent des coûts énergétiques élevés liés à l'aération nécessaire pour fournir suffisamment d'oxygène (O_2) aux micro-organismes aérobies. En revanche, dans le traitement des eaux usées à base de microalgues, les microalgues fournissent l'O_2 aux micro-organismes aérobies par photosynthèse.[78] - Technologie verte Empreinte carbone minimale..[79] - Faible consommation d'énergie à faible régime de mélange Production de sous-produits secondaires, c'est-à-dire d'engrais, de biogaz, puis de postes de travail supplémentaires dans des exploitations agricoles ou des zones rurales Eaux usées traitées pour réutilisation, utilisation du biogaz comme combustible atténuant les émissions de CH_4 dans l'atmosphère[79] - Ce processus contribue également à réduire les émissions de gaz à effet de serre. - une très forte réduction des agents pathogènes (c'est-à-dire une élimination efficace des coliformes totaux)[39] - une récupération efficace des nutriments de la biomasse.[80] - Les coûts des engrais dans les agro-industries sont réduits car la biomasse de microalgues peut être utilisée comme engrais.	- Plusieurs paramètres physiques, chimiques et environnementaux affectent la culture des microalgues (les conditions optimales de culture des microalgues doivent être respectées)[79] - Problèmes de santé dus aux propriétés neurotoxiques de certaines algues.[81] - La méthode de récolte des microalgues coûte cher.[82] - Récolter les microalgues et les séparer des eaux usées est difficile et nécessite des coûts supplémentaires.[71]

III. 4 Choix des souches de microalgues pour le traitement des eaux usées :

Il existe des principes de sélection des microalgues avant de les utiliser dans le traitement de l'eau, et les critères de sélection peuvent varier d'un type à l'autre.

III. 4. 1 Endurance et résistance :

Il convient de choisir des souches d'algues capables de s'adapter aux conditions environnementales moisis telles que les fluctuations de température, d'humidité et de produits chimiques.

Par exemple, les microalgues travaillent en symbiose avec des bactéries pour éliminer les contaminants présents dans les eaux usées et sont donc soumises à des conditions bien contrôlées pour leur fonctionnement continu.

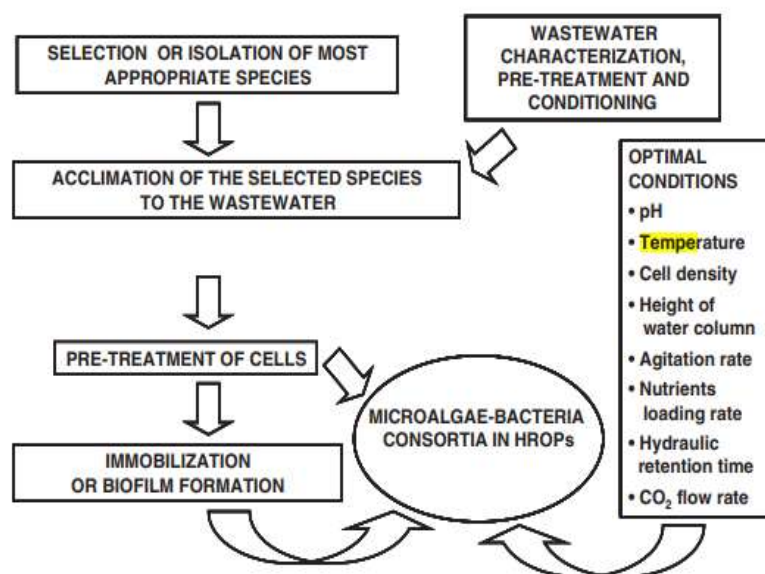


Figure III-5: Un schéma des étapes et des conditions opératoires nécessaires à la création de consortiums de microalgues et de bactéries pour traiter les eaux usées et produire du biodiesel.[82]

III. 4. 2 Taux de croissance et de productivité :

- Les souches d'algues ayant un taux de croissance rapide et une productivité élevée doivent être sélectionnées pour obtenir des taux d'élimination efficaces des contaminants.[83]
- Les souches à forte productivité de biomasse sont plus adaptées au traitement de l'eau[39]

III. 4. 3 Propriétés biologiques et chimiques :

- Les souches sélectionnées doivent présenter des caractéristiques biologiques et chimiques adaptées, telles que vitesse de croissance, production de biomasse et d'oxygène.

Il est également nécessaire d'évaluer la capacité des souches à développer des formes résistantes aux environnements sévères.[39]

-Les souches doivent être capables d'éliminer les principaux contaminants tels que les matières organiques, les nutriments (azote et phosphore) et les métaux lourds avec une grande efficacité.

Cela nécessite d'étudier la capacité de chaque souche à absorber et transformer ces polluants.[84]

III. 5 Les applications des microalgues :

Après le processus de traitement de l'eau, des microalgues se forment, chargées de nutriments et exploitées pour diverses applications. Les microalgues ont un certain nombre d'utilisations dans les industries. La biomasse algale contient trois composants principaux : les glucides, les protéines et les lipides/huile naturelle. La teneur élevée de ces molécules commercialement importantes a entraîné une intensification de la recherche dans des domaines allant de l'industrie alimentaire, des produits nutra- et pharmaceutiques aux biocarburants et à la phycomédiation (**Figure III-6**) :

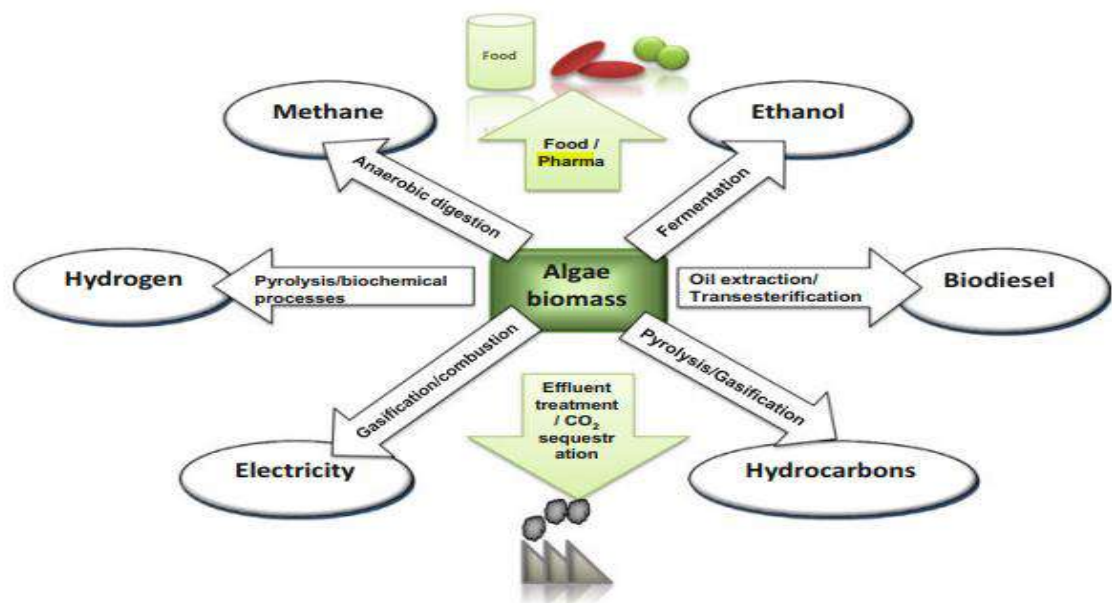


Figure III-6: Utilisations industrielles actuelles des algues[4]

III. 5. 1 Biodiesel :

La production de lipides dans les microalgues est affectée par les conditions de culture, la séquestration du dioxyde de carbone et les sources de carbone organique. Les acides gras de la biomasse sont décomposés pour produire des triglycérides (TGA), du cholestérol et des lipides.

En raison de la capacité des microalgues à stocker une grande quantité de lipides même lorsqu'elles sont exposées à des conditions environnementales défavorables, le processus d'estérification croisée peut être utilisé efficacement dans la production de biodiesel. Les graisses constituent donc l'un des composés biologiques les plus importants nécessaires à la production de biodiesel. Lamontre les différentes étapes qui composent la production de biodiesel à partir de la biomasse de microalgues.[4]



Figure III-7: Biodiesel à partir de biomasse de microalgues[4]

III. 5. 2 Bioéthanol :

Afin d'améliorer l'indice d'octane des carburants dérivés du pétrole et de réduire les émissions de CO, le bioéthanol est souvent combiné avec des carburants dérivés d'autres sources d'énergie. La production de bioéthanol renouvelable de deuxième génération implique l'utilisation de déchets lignocellulosiques agroindustriels comme source de cellulose et d'hémicellulose **Figure III-8**. La cellulose et l'hémicellulose sont ensuite hydrolysées par voie enzymatique pour produire des sucres fermentescibles. La fermentation est une autre méthode de production de bioéthanol à partir de gaz de synthèse, qui peut également être produit par gazéification du charbon et de la biomasse ou des déchets solides municipaux. [4]

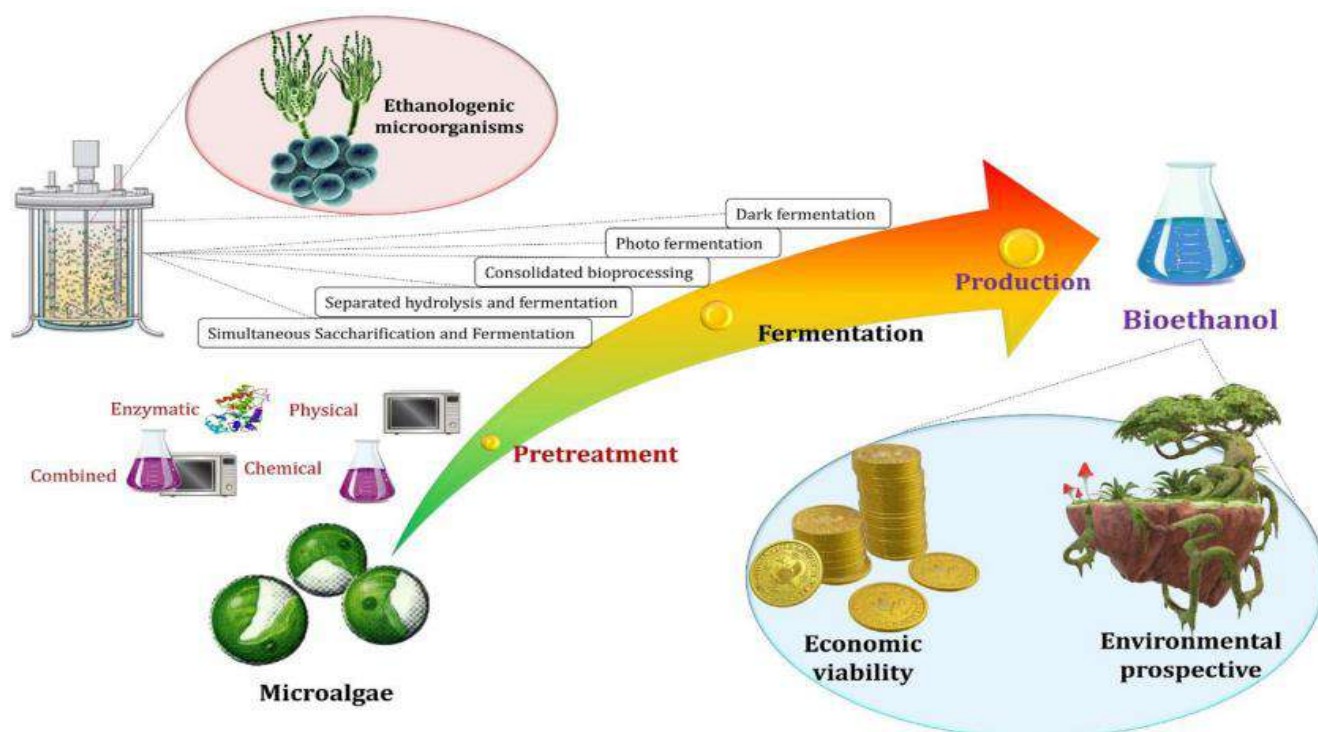


Figure III-8: Méthodes utilisées pour la production de bioéthanol à base de microalgues. [4]

III. 5. 3 Biométhane :

Les microalgues peuvent être utilisées pour produire du biogaz afin de produire de l'électricité, des piles à combustible et du carburant liquide. Parce qu'elle contient une quantité relativement faible de lignine et de cellulose, la biomasse de microalgues est une matière première prometteuse pour la production de biogaz par le processus de digestion anaérobie (DA). Les gaz combustibles et les gaz qui causent la corrosion sont tous deux des composants du biogaz. En plus des traces de sulfure d'hydrogène (H_2S), le biogaz est composé de méthane (CH_4), de CO_2 , d'hydrogène et d'ammoniac. [4]

III. 5. 4 Bio-hydrogène :

Le bio-hydrogène est une source efficace d'énergie renouvelable qui suscite actuellement de nombreuses recherches. Il n'est ni toxique, ni polluant, plus énergétique que le pétrole et abondant. En revanche, les techniques de production disponibles à ce jour comme par exemple l'électrolyse de l'eau, la gazéification ou la pyrolyse de la biomasse disposent de coûts de production élevés[85]. Depuis plusieurs années, les microalgues et les bactéries ont été étudiées à

Chapitre IV Méthodes de culture des microalgues pour le traitement des eaux usées

cette fin. Dans la production de biohydrogène et de biométhane, les microalgues agissent comme source de carbone pour les méthanogènes et les bactéries avec l'enzyme hydrogénase. De plus, certaines microalgues peuvent également produire de l'hydrogène. Par exemple, *Chlamydomonas reinhardtii* est capable de passer de la production d'oxygène à la production d'hydrogène dans des conditions de manque de soufre.[86]

Les algues vertes et les cyanobactéries peuvent être utilisées pour produire de l'hydrogène biologique par biophotolyse de l'eau. Trois façons différentes de produire de l'hydrogène comprennent, la photolyse directe, la photolyse indirecte.[5]

III. 5. 5 Composés bioactifs :

Les microalgues sont connues pour avoir des métabolites secondaires qui produisent des produits pharmaceutiques et des compléments alimentaires à valeur ajoutée, tels que l'astaxanthine, les acides gras oméga trois, les stérols, les protéines, les enzymes, les vitamines et les pigments. Le tableau 6 résume les composés bioactifs produits par chaque espèce de microalgue. Les métabolites primaires sont des composants utilisés pour la croissance, notamment les glucides, les protéines et les lipides.[87]

Tableau III-3: Espèces de microalgues qui ont des composés bioactifs utiles[88]

Espèces de microalgues	Composés bioactifs	Type of cultivation
Spirulina platensis	Phycocyanine	Étangs ouverts
Dunaliella salina	Caroténoïdes, β -carotène	Étangs ouverts
Haematococcus pluvialis	Caroténoïdes, astaxanthine	Étangs ouverts, bioréacteur
Lyngbya majuscula	Modulateurs immunitaires	Étangs ouverts

III. 5. 6 Engrais et biofertilisants :

La biomasse de microalgues peut être transformée en engrais pour plantes afin d'améliorer la composition minérale des sols dépourvus de minéraux et de capacité de rétention d'eau. Pour les agro-industries, ce processus peut réduire les coûts des engrais en recyclant les nutriments dans les sols. Si les eaux usées sont directement utilisées sans traitement approprié, la santé du sol peut

Chapitre IV Méthodes de culture des microalgues pour le traitement des eaux usées

diminuer. Par exemple, il a été constaté que l'irrigation utilisant des eaux usées brutes de sagou comme engrais entraîne une croissance, un rendement et une santé des sols plus faibles. [87]

III. 5. 7 Alimentation animale :

La qualité des aliments est importante pour les animaux car elle influence leur santé. Des études ont été menées sur l'utilisation des microalgues dans l'alimentation animale car elles contiennent des glucides, des protéines et d'autres nutriments nécessaires à la croissance des animaux. De plus, les microalgues ont également une teneur en protéines plus élevée que les plantes terrestres. Pulz et Gross ont signalé qu'*Isochrysis galbana* cultivé dans des étangs ouverts contient des acides gras adaptés à la nutrition animale. Phang et al. Ont constaté que la composition de la biomasse de la spiruline cultivée dans un HRAP pour le traitement des eaux usées de sagou peut être utilisée comme aliment pour animaux de haute qualité, en particulier dans l'industrie de l'aquaculture. Comme le poisson représente environ 17 % de la consommation mondiale en termes de protéines animales, l'utilisation de microalgues comme aliments pour poissons pourrait garantir la qualité des protéines de poisson. [87]

III. 5. 8 Production de biopolymères :

Production de biopolymères à partir de microalgues Les produits fabriqués à partir de polymères ou de plastiques jouent un rôle clé dans plusieurs aspects de la vie moderne. La plupart des produits de base disponibles sur le marché aujourd'hui sont fabriqués avec des plastiques dérivés de produits chimiques à base de pétrole tels que le polypropylène (PP), le polyéthylène (PE) et le polychlorure de vinyle (PVC). L'utilisation généralisée de ces plastiques au fil des ans a eu un impact environnemental négatif énorme résultant des émissions de CO₂ et de la persistance de matériaux non biodégradables dans le sol et l'eau.[89, 90]

CHAPITRE IV
D'ÉTUDE ET POTENTIEL
APPLICATIONS DANS LE
SUD ALGÉRIEN

Chapitre IV Étude et potentiel applications dans le sud algérien :

De nombreuses régions sont confrontées à des défis environnementaux liés au traitement de la pollution des eaux usées. Des études se sont concentrées sur la réduction du pourcentage de pollution dans les eaux usées dans différents pays, notamment les études suivantes :

IV. 1 L'étude :

Traitement des eaux produites de pétrole (EPP) par des microalgues et études des procédés de récupération de la biomasse[91].

IV. 1. 1 Site d'étude:

Les échantillons des EPP sont récupérés du champ pétrolier, Bir Seba, Ouargla. Ce champ assure une production initiale de 20.000 barils/j, avant de passer à 40.000 barils/j à l'horizon 2019. Ses réserves sont de l'ordre de 758 millions de barils, et génère 50.000 barils/jour d'EPP.

Dans cette étude, l'eau provenant de produits pétroliers a été traitée avec la microalgue *Chlorella pyrenoidosa*.

L'étude a été réalisée dans la région d'Ouargla, qui est située au Sud-Est de l'Algérie, à une distance de 850 km de la capitale Alger.

Couvre une superficie de 163,233 km². Les coordonnées géographiques de cette région sud-est sont: Longitude : est, 5° 19'-1" et nord : 31° 57'-1 et altitude moyenne : 134 m.

La région d'étude est limitée au nord par les wilayas de Djelfa, Biskra et d'El-Oued, à l'est par la Tunisie, au sud par les wilayas de Tamanrasset et d'Ilizi et à l'ouest par la wilaya de Ghardaïa [77]. À Ouargla, comme dans la plupart des oasis du Sahara, les seules ressources hydriques disponibles sont d'origine souterraine[91].

- **Dans les conditions suivantes :**

- **La température :**

La température moyenne annuelle est de 23,5 °C, avec un maximum de 35,04 °C au mois d'Août et un minimum de 11,54 °C au mois de janvier.

○ **Les vents :**

Les vents dominants sont les vents N/NE et S/SE. Le siroco se manifeste principalement pendant le printemps. La vitesse du vent atteint un maximum de 4,91 m/s au mois de mai et un minimum de 2,72 m/s au mois de décembre.

○ **L'insolation :**

Dans la région d'Ouargla, le rayonnement solaire est excessif durant l'année. La répartition des moyennes mensuelles d'insolation nous permet de constater que la brillance du soleil est maximale au cours du mois de juillet de 332,51 (heures/mois) avec une moyenne de 352,29 (heures/mois) heures, le phénomène est régulier passant d'un minimum en décembre (208,57 heures/mois).

L'évaporation Notre région d'étude est caractérisée par une évaporation très importante. L'évaporation moyenne annuelle est de 273,72 mm avec 451,26 mm au mois de juillet et 96,19 mm au mois de janvier.

○ **Précipitation :**

Les précipitations sont rares et irrégulières. Elles sont de l'ordre de 65,87 mm/an et surviennent généralement de septembre à novembre courant janvier et mars.

Le milieu agricole se trouvait dans un système ouvert riche en dioxyde de carbone, phosphore, azote, métaux lourds, DCO et oxygène dissous.

IV. 1. 2 Méthode et matériaux :

La partie expérimentale de ce travail et les analyses physico-chimiques ont été réalisées au niveau du laboratoire dynamique Interaction et Réactivité des Systèmes (DIRS), Université

Kasdi Merbah d'Ouargla et au laboratoire Eau-Environnement (LEE), Université Hassiba ben Boulai de Chlef.

- La température (°C) et l'intensité de la lumière (W/m²) ont été mesurées par un solarimètre (SL200, instrument KIMO, France). L'Oxygène dissous (DO), le pH et la conductivité ont été mesurés à l'aide d'analyseurs multiparamétriques (Consort C3020, Belgique).
- La croissance microorganique a été évaluée par mesure de la densité optique à 680 nm

(DO 680 nm) en utilisant la spectrophotométrie UV/vis (Spectrophotomètre UV 2300).

Cependant, la densité optique (DO) à 680 nm liée aux matières en suspension (MS) présente dans les eaux usées a été soustraite de la DO 680 nm total (avec de la biomasse),

La concentration de MS dans les eaux usées est considéré constante avec le temps.

- La concentration finale en biomasse des algues a été calculée en soustrayant la matière en suspension totale (MST) des eaux usées, mesurées avant l'inoculation des solides de suspension volatile totale (TVSS) des eaux usées avec des algues mesurées à la pondent de la culture selon la méthode standard.

➤ La demande chimique en oxygène (DCO) a été déterminée avec des kits de tests LCK 514 (100-2000 mg DCO/L), selon la norme DIN 38049-4.

➤ Azote total (NT), azote ammoniacal (N-NH_4^+), azote nitreux (N-NO_2^-) et azote nitrique (N-NO_3^-) (mg/L) : Les différentes formes de l'azote sont dosées directement par les méthodes normalisées (NF EN 25663 – ISO 5663), (NF T90 – 015), (NF EN 26 – 777), (NF T90 – 045) respectivement (O. I. Eau, 2005). Ils sont mesurés selon la méthode de test en tubes N5/25 (WTW) et à l'aide d'un Spectrophotomètre de type WTW Photolab spectral, nécessitant des réactifs propres à chacun d'entre eux.

➤ Le phosphore total (Pt) a été mesuré selon les normes ISO 6878-1-1986, DIN 38405 D11-4. Hach Lange test kit LCK 349 gammes de P-PO_4 (2-20 mg TP/L

- Pour l'analyse de DCO, tous les échantillons ont été chauffés pendant 2 h à 148 °C avant d'être lus sur le spectrophotomètre.
- Pour l'analyse de phosphore total, les échantillons ont été chauffés pendant 60 minutes à 100 °C dans un thermostat à haute température (HT 200S, Allemagne).

Les teneurs en métaux lourds ont été déterminées à l'aide d'un spectrophotomètre d'absorption atomique (AAS) dont le principe de fonctionnement est cite en l'annexe.

IV. 1. 3 Analyse et résultat :

Les résultats de cette étude ont montré des changements dans les caractéristiques avant et après le traitement dans des proportions (10 %, 20 %, 30 %, 40 %, 50 %, 60 %, 70 %, 80 %, 90 %, 100 %). de la culture a été étudiée pendant 14 jour en mesurant la densité optique.

Tableau IV-1 : des caractéristiques et résultats du traitement des eaux usées avec *Chlorella pyrenoidosa*.

Caractéristiques	(EPP) Brute	Traitement des algues	discussion
pH	5,19	7,5	L'absorption du dioxyde de carbone par les microalgues augmente l'acidité de l'eau
Oxygène dissous OD (mg/L)	2	8,5	Les microalgues libèrent de l'oxygène
Conductivité (mS/cm)	24,1	33,4	Bonne minéralisation de l'eau et changement de concentration en sels minéraux
azote total (NT)	56 mg/L	24 mg/L	Les algues se nourrissent d'azote
Phosphore total (PT)	4,9 mg/L	1,2 mg/L	Le principal mécanisme d'élimination du phosphore était l'accumulation de biomasse d'algues et la précipitation du phosphate pourrait avoir une influence mineure ici en raison de la faible valeur du pH.
DCO	3873 mg/L	400 mg/L	L'EPP se caractérise par une demande chimique élevée en oxygène due à la présence de composés organiques ou à l'effet de la quantité d'huiles présentes. La DCO évolue en sens inverse avec OD, reflétant l'utilisation potentielle de l'oxygène pour décomposer la matière carbonée.
Fe²⁺	4,73 mg/L	1,10 mg/L	Le fer est essentiel Pour le bon développement des cellules d'algues.
Pb²⁺	3,648 mg/L	0,99 mg/L	Les changements de ces valeurs sont dus à la grande surface d'adsorption résultant de sa structure filamenteuse Et ses nombreuses branches, ou peut-être la raison en est-elle due à sa grande capacité à libérer le processus d'absorption, ainsi qu'à la différence Dans la structure des membranes cellulaires
	3,27 mg/L	0,87 mg/L	
Cd²⁺	0,095 mg/L	0,049 mg/L	

IV. 2 L'étude :

Traitement de l'eau du journal désinfecté en utilisant deux types d'algues *Chlorella*, *Lyngobia*, sp [92].

IV. 2. 1 Site d'étude :

J'ai utilisé deux types d'algues parmi celles trouvées dans l'environnement irakien et obtenues auprès des laboratoires du ministère Science et technologie, dont l'une appartient au phylum des algues bleu-vert, *Lyngobia*, sp, et l'autre type Elle appartient au phylum des algues vertes, qui sont *Chlorella*. Les isolats d'algues ont été multipliés en les cultivant dans un milieu de culture chu10.

L'étude a utilisé deux types d'algues pour réduire les contaminants dans les eaux usées laitières, en utilisant *Lyngobia* et *Chlorella*. Les mesures du DCO, des PO_4 et des NO_3 ainsi que de la croissance algale ont été prises à 22 °C et à 32 °C respectivement. Les résultats de l'étude ont montré que les taux de suppression les plus élevés pour *Lyngobia* étaient de 62 %, 83 %, 74 % et 95 % à 22 °C respectivement, tandis que pour *Chlorella* ils étaient de 71 % et 71 % à 32 °C, 88 % et 95 % à 22 °C respectivement, et 95 %, 98 %, 99 % et 95 % à 22 °C respectivement, et *Chlorella* à 95 %, 95 % et 98 % à 32 °C respectivement. Pour l'essai de densité optique, il y a eu une augmentation de la densité optique des deux moitiés d'algues pendant l'expérience.

IV. 2. 2 Méthode et matériaux :

Le milieu de culture a été préparé sous forme de solutions de secours et conservé dans le réfrigérateur à une température de quatre degrés Celsius jusqu'à utilisation. Le milieu de culture a été préparé en prenant 2,5 ml de chaque solution de secours par litre d'eau distillée exempte d'ions, et le pH a été ajusté à 7-6,8. La stérilisation a été effectuée en utilisant un autoclave à une température de 121 degrés Celsius et une pression de 1,5 atm pendant 15 minutes, puis conservée au réfrigérateur jusqu'à utilisation.

IV. 2. 3 Analyse et résultat :

Pour l'algue *Lyngobia*, les résultats ont montré des taux d'élimination différents le premier jour de l'expérience, avec un taux maximal de 62 % à 22 °C, tandis qu'il était de 16 % à 32 °C. Cela est attribué au stade de croissance et d'adaptation de l'algue, qui a été affecté par la température élevée. Le quatrième jour, les résultats ont révélé un taux maximal d'élimination de 85 % à 22 °C, et un taux minimal de 38 % à 32 °C, montrant clairement l'effet de la température sur la capacité

d'absorption de l'algue. Le dixième jour, lorsque l'algue a atteint un stade de stabilité, le taux d'élimination le plus élevé était de 74 % à 22 °C, tandis que le taux le plus bas était de 46 % à 32 °C, confirmant l'impact de la température sur l'absorption de la matière organique par l'algue. Le dernier jour de l'expérience, le taux d'élimination le plus élevé était de 95 % à 22 °C, tandis que le taux le plus bas était de 48 % à 32 °C, indiquant que l'algue était parvenue à un stade de stabilité.

Tableau IV-2: Tableau de variation en pourcentage de la DCO par *Lngeybia*,sp [92].

jour	22C°	32C°
1	62%	16%
4	85%	38%
10	74%	46%
14	95%	48%

Les résultats du des taux d'élimination variables de la matière organique par l'algue *Chlorella*, mesurés par le test de la DCO (Demande Chimique en Oxygène). Le premier jour de l'expérience, le taux le plus élevé d'élimination était de 71 % à 32 °C, tandis qu'il était de 28 % à 22 °C. Cela s'explique par le fait que l'algue était dans une phase d'acclimatation et d'adaptation. Le quatrième jour de l'expérience, le taux d'élimination le plus élevé était toujours à 71 % à 32 °C, tandis que le taux le plus bas était de 52 % à 22 °C, indiquant que l'algue était dans une phase de croissance accrue, ce qui lui permettait d'absorber davantage de matière organique.

Le dixième jour, le taux d'élimination le plus élevé était de 88 % à 22 °C, et le taux le plus bas était de 19 % à 32 °C, probablement en raison de la fin de la phase de croissance accrue de l'algue. Le dernier jour de l'expérience, le taux d'élimination le plus élevé était de 94 % à 22 °C, tandis que le taux le plus bas était de 61 % à 32 °C, ce qui suggère que l'algue était parvenue à une phase de absorbant la plupart de la matière organique dans l'eau.

Tableau IV-3: Tableau de variation en pourcentage de la DCO par Chlorella [92].

jour	22C°	32C°
1	32%	71%
4	52%	71%
10	88%	19%
14	94%	61%

Les résultats ont montré que l'algue *Lyngbya* a la capacité d'éliminer les nitrates NO_3 . Le premier jour de l'expérience, le taux le plus élevé d'élimination était de 95 % à 22 °C, tandis que le taux le plus bas était de 44 % à 32 °C. Cela indique que l'algue était dans une phase d'acclimatation et d'adaptation, et qu'elle avait la capacité d'absorber les nutriments pour soutenir sa croissance.

Le quatrième jour de l'expérience, le taux d'élimination le plus élevé était de 97 % à 22 °C, tandis que le taux le plus bas était de 59 % à 32 °C, ce qui indique que l'algue était dans une phase de croissance accrue et qu'elle avait toujours la capacité d'absorber les substances malgré l'effet de la température. Le dixième jour de l'expérience, le taux d'élimination le plus élevé était toujours de 97 % à 22 °C, tandis que le taux le plus bas était de 12 % à 32 °C, indiquant que l'algue avait été affectée par la température élevée, entraînant sa décomposition. Le dernier jour de l'expérience, le taux d'élimination le plus élevé était de 95 % à 22 °C, tandis que le taux le plus bas était de 26 % à 32 °C, soulignant l'impact clair de la température sur la capacité de l'algue à absorber les substances et les nutriments.

Tableau IV-4: Tableau de variation en pourcentage de la NO_3 par *Lyngbya*, sp [92].

jour	22C°	32C°
1	95%	44%
4	97%	59%
10	97%	12%
14	95%	26%

Les résultats ont montré que l'algue *Chlorella* a une capacité d'absorption des nitrates NO_3 . Le premier jour de l'expérience, le taux le plus élevé d'élimination était de 95 % à 32 °C, tandis que le taux le plus bas était de 26 % à 22 °C. Cela s'explique par le fait que l'algue *Chlorella*, qui appartient à la famille des algues vertes, a une capacité de consommation abondante, ce qui se traduit par sa forte capacité d'absorption dès le premier jour. Le quatrième jour de l'expérience, le taux d'élimination le plus élevé était toujours de 95 % à 32 °C, tandis que le taux le plus bas était de 53 % à 22 °C, indiquant que l'algue était dans une phase de croissance accrue.

Le dixième jour de l'expérience, le taux d'élimination le plus élevé était de 98 % à 22 °C, tandis que le taux le plus bas était de 61 % à 32 °C, ce qui suggère que l'algue était parvenue à une phase de stabilité et avait absorbé la plupart des nutriments disponibles. Le dernier jour de l'expérience, le taux d'élimination le plus élevé était de 97 % à 22 °C, tandis que le taux le plus bas était de 44 % à 32 °C, ce qui indique que l'algue avait consommé une quantité importante de nutriments et que la température avait un effet significatif sur sa capacité d'absorption.

Tableau IV-5: Tableau de variation en pourcentage de la NO_3 par *Chlorella* [92].

jour	22C°	32C°
1	26%	95%
4	53%	95%
10	98%	61%
14	97%	44%

- Le tableau montre la capacité d'élimination du phosphate PO_4 par les algues *Lyngbya* et *Chlorella* :

Pour l'algue *Lyngbya*, la capacité d'absorption du phosphate PO_4 a été observée dès le premier jour de l'expérience, où le taux le plus élevé d'élimination était de 96 % à 32 °C, tandis que le taux le plus bas était de 70 % à 22 °C. Cela est attribuable à l'effet de la température sur les formes de

phosphates présentes dans l'eau. Le quatrième jour de l'expérience, le taux d'élimination le plus élevé était de 91 % à 22 °C, tandis que le taux le plus bas était de 61 % à 32 °C.

Cela est dû au fait que l'algue était dans une phase de croissance accrue, en plus de l'effet de la température. Le dixième jour de l'expérience, le taux d'élimination le plus élevé était de 97 % à 22 °C, tandis que le taux le plus bas était de 53 % à 32 °C. Les mêmes raisons précédentes s'appliquent, à savoir que la température affecte la forme des phosphates dans l'eau, entraînant une variation de la capacité des algues à les absorber. Le dernier jour de l'expérience, le taux d'élimination le plus élevé était de 95 % à 22 °C, tandis que le taux le plus bas était de 34 % à 32 °C, pour les mêmes raisons précédemment mentionnées, en plus du fait que l'algue avait atteint une phase de stabilité.

Tableau IV-6: Tableau de variation en pourcentage de la PO₄ par *Lyngebia*, sp[92].

jour	22C°	32C°
1	70%	96%
4	91%	61%
10	97%	53%
14	95%	34%

La capacité de l'algue *Chlorella*, appartenant à la famille des algues vertes, à absorber les phosphates PO₄ a été démontrée par les résultats. Le premier jour de l'expérience, le taux le plus élevé d'élimination était de 99 % à 22 °C, tandis que le taux le plus bas était de 72 % à 32 °C. Cela est attribué à l'effet de la température sur les différentes formes de phosphates présentes dans l'eau, ainsi qu'à la capacité de l'algue à en tirer profit.

Le quatrième jour de l'expérience, le taux d'élimination le plus élevé était de 97 % à 32 °C, tandis que le taux le plus bas était de 71 % à 22 °C, indiquant que l'algue était dans une phase de croissance accrue, en plus de l'effet de la température. Le dixième jour de l'expérience, le taux d'élimination le plus élevé était de 97 % à 22 °C, tandis que le taux le plus bas était de 2 % à 32 °C, ce qui montre l'impact de la température. Le dernier jour de l'expérience, lorsque l'algue était

parvenue à une phase de stabilité, le taux d'élimination le plus élevé était de 97 % à 22 °C, tandis que le taux le plus bas était de 41 % à 32 °C, pour les mêmes raisons précédemment mentionnées.

Tableau IV-7: Tableau de variation en pourcentage de la PO₄ par Chlorella[92].

jour	22C°	32C°
1	99%	72%
4	71%	94%
10	97%	32%
14	97%	41%

IV. 3 L'étude :

Le rôle de certaines algues bleu-vert dans la biotransformation de certains éléments métalliques lourds[93]

IV. 3. 1 Site d'étude:

Quatre sites ont été choisis sur l'Euphrate, près de la ville de Nassiriyah, pour compléter l'étude en cours. Le premier site est situé au nord-ouest de la ville. Nassiriyah lorsque le fleuve entre dans la ville dans la région de Sharif, à 10 km de la centrale thermique de Nassiriyah. Le deuxième site est situé au bord de la rivière dans la zone de drainage de l'eau chaude de la centrale électrique thermique de Nassiriyah sur la rivière Ama. Le troisième site est considéré comme le site le plus pollué par les polluants organiques, car de grandes quantités d'eaux usées non traitées s'y déversent également. Il contient des déchets organiques et est situé au bord de la rivière dans la zone de drainage des eaux usées. Enfin, le quatrième site, qui est situé au sud-est de la ville. Le fleuve Euphrate est à environ 10 km du troisième site.

IV. 3. 2 Méthode et matériaux :

Des échantillons d'algues ont été collectés sur les sites d'étude sur une base mensuelle et pendant une année entière en obtenant des échantillons d'eau à l'aide de bouteilles en plastique propres d'une

capacité de (500)cm. Il a été planté en utilisant le milieu de culture (10-Chu) modifié par (Aaragy-Al, 1996) pour la culture des algues *Microcystis aeruginosa* et *aureus Hapalosiphon*, qui a été préparé sous forme de solutions mères, puis le milieu a été stérilisé à l'aide d'un autoclave. À une température de 121°C et une pression de 5,1 PSI/in pendant 20 minutes.

Ensuite, les échantillons d'algues ont été concentrés après les avoir collectés à l'aide d'une centrifugeuse à une vitesse de 3 000 tr/min. Les algues ont été cultivées sur le milieu de culture solide en utilisant la méthode de Stearking. Après avoir obtenu des isolats d'algues uniques, elles ont été transférées dans la salle de culture d'algues préparée pour la culture d'algues, où les facteurs environnementaux ont été déterminés dans le but d'obtenir la meilleure croissance, ce qui a été le cas. Représenté par une intensité lumineuse comprise entre (130 et 150) microns/m² /s², et une période d'éclairage de 16 lumières : 8 sombres et une température de (25+2) C°.

Après avoir préparé les algues, elles sont cultivées dans des milieux contenant différentes concentrations de deux métaux lourds, le cadmium (Cd) et le plomb (Pb), à des concentrations de (0,10, 0,25, 0,50, 1,0 et 2,0) mg/L

IV. 3. 3 Analyse et résultat :

Les graphiques suivants représentent les résultats les plus marquants obtenus grâce au traitement utilisant *M.aeruginosa* et *H.aureus* :

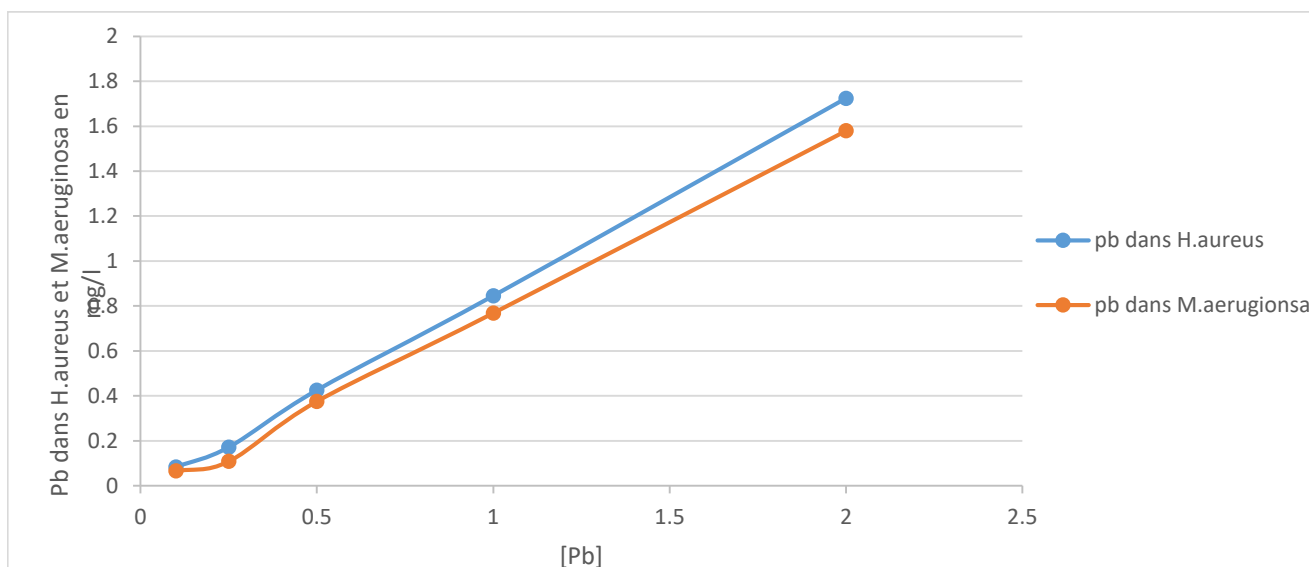


Figure IV-1: une courbe graphique comparant l'évolution des concentrations de [Pb]

- Analyse graphique :

Le graphique représente une courbe graphique comparant l'évolution des concentrations de plomb dans les milieux agricoles utilisant deux types d'algues (M.aerugionsa et H.aureus), où l'on remarque une légère différence entre les taux de réduction des concentrations de plomb, car les algues H.aureus ont réduit le plomb. Concentration avec une légère différence par rapport à M.aeruginosa.

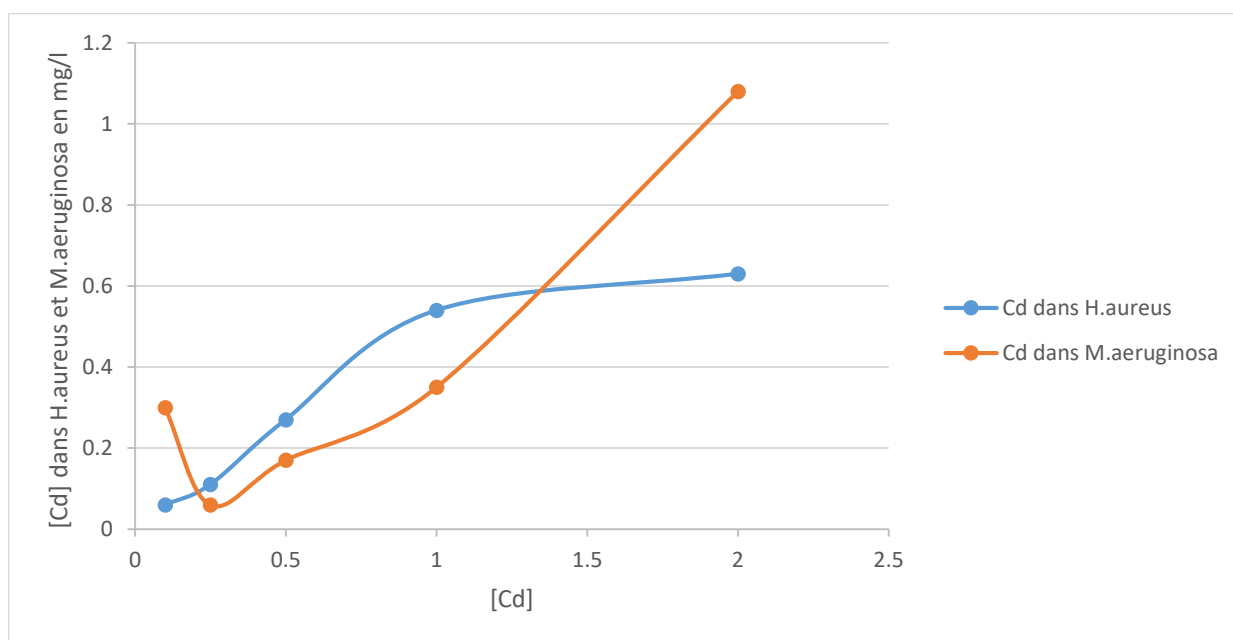


Figure IV-2: une courbe graphique comparant l'évolution des concentrations de [Cd]

- Analyse graphique :

Le graphique représente une courbe graphique comparant l'évolution des concentrations de cadmium dans les milieux agricoles utilisant deux types d'algues (M.aerugionsa et H.aureus), où nous avons remarqué que M. aerugionsa était bien meilleur que H. aureus pour l'élimination du cadmium. Nous constatons que la mousse H.aureus élimine mieux le Pb, tandis que la mousse M.aerugionsa élimine mieux le Cd.

IV. 4 L'étude :

Culture de *Chlorella pyrenoidosa* dans des étangs extérieurs à ciel ouvert utilisant les eaux usées domestiques comme milieu dans les zones désertiques arides[94]

IV. 4. 1 Site d'étude:

L'étude a été menée dans une station d'épuration nationale des eaux usées. Il est situé au nord-est de la capitale, Ouargla, en Algérie (géographie) Coordonnées graphiques : Latitude : 31°59'46.23'N, Longitude : 5°21'55.77'E). Les expériences ont été menées en hiver la période d'utilisation de la lumière du soleil comme source de lumière. Les températures variaient entre 18 et 31 degrés Celsius le jour et entre 6 et 15 degrés Celsius la nuit. La durée d'insolation durant cette saison était d'environ 9 heures 1 journée (7h-17h) ; Le rayonnement maximum était d'environ 1 100 W/m² Ceci a été mesuré à l'aide d'un compteur d'énergie solaire (SL200, KIMO) Outil, France). Les eaux usées utilisées dans cette étude provenaient Le lac offre des bains d'air immédiatement après l'étape primaire de traitement. Les expériences ont été menées en laboratoire pendant 7 jours.

IV. 4. 2 Méthode et matériaux :

La *Chlorella pyrenoidosa* a été utilisée dans cette étude. C'étaient des cultures cultivé en laboratoire. Toutes les vaccinations ont été effectuées sous conditions stériles. 6 ml (7,5106 cellules/ml) de *C. pyrenoidosa* ils ont été inoculés dans 500 ml de milieu stérile BG11 dans 1000 ml fioles Erlenmeyer. Une fois qu'il atteint une densité suffisante, il le fait l'inoculation a été réalisé dans trois flacons coniques de 1 000 ml. Toutes les cultures sont placées dans la culture armoire équipée de diodes électroluminescentes (LED) bleues et rouges (L'intensité de la lumière est de 100 umol photons m² s⁻¹) comme source de lumière. Quant au mélange, il s'est fait au moyen de bulles d'air continues, tout en maintenant la température entre 24 et 26 degrés Celsius et le pH en dessous de 7 à 8. Conditions stériles.

IV. 4. 3 Analyse et résultat :

Le graphique suivant représente les résultats obtenus grâce au traitement :

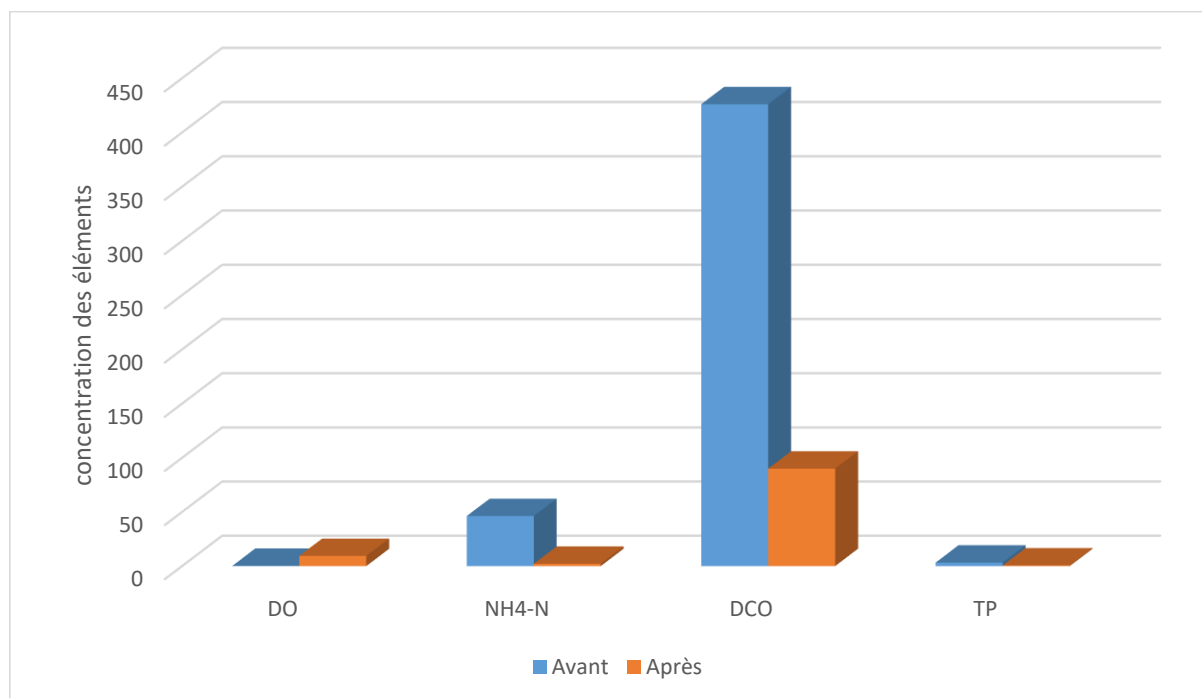


Figure IV-3 : Résultats du traitement à la *Chlorella pyrenoidosa* avant et après le traitement.

Le graphique représente des colonnes graphiques des résultats d'une analyse des concentrations de certains éléments présents dans les eaux usées de la station avant et après traitement par l'algue *C. Pyrenoidosa*. On constate que la concentration des éléments (DO, NH₄, DCO, TP) était. Sa concentration avant le traitement (0,246, 2,426, 22 mg/l) respectivement, tandis qu'après le traitement avec des algues, elle est devenue (9, 4,2, 1,90, 596 mg/l) respectivement. Nous constatons que cette microalgue était efficace pour éliminer. Polluants dans l'eau.

IV. 5 L'étude :

Traitement des eaux usées par les microalgues[56]

IV. 5. 1 Site d'étude :

Tableau IV-8: données générales de la STEP[56]

Nom de la station	station d'épuration a filtres plantés de roseau du ksar M'RAGUEN	
Commune	ADRAR	
Wilaya	ADRAR	
Localités concernées par le traitement	Ksar M'raguen	
Superficie de l'assiette	Assiette réservée 1000m ² Surface utile 1 384m ²	
Milieu récepteur	Milieu naturelle	
Procédé d'épuration	Filtration par plantes (roseaux)	
Capacité de la station	850 EQH	100 m3/j
Nature des eaux brutes	Domestique	
Type du dispositif d'assainissement de la ville	Unitaire	
Alimentation en eau usée	Ksar M'raguen	
Impact de réalisation de la station	Préservation de l'environnement oasien	
Groupement de réalisation - Génie civil - Equipements	- Entreprise de Saïd Amer Samir	
Date de mise en service de la station	10/11/2015	
Date de transfert de la station à l'ONA	11/01/2016	
Date de mise en service de l'extension	01/07/2018	

IV. 5. 2 Méthode et matériaux :

La biomasse de *C. pyrenoidosa* et *Chlorococcum*, sp cultivée dans les eaux usées de la station d'épuration du Ksar de M'raguen ont été récoltée par centrifugation à 9500 tr/min pendant 5 minutes ; cette biomasse a été lavée deux fois avec de l'eau distillée, puis séchée à l'étuve à 75 °C pendant 48 heures. Ensuite, des échantillons sont prélevés pour analyse physique et chimique.

Cette étude s'articule autour de deux types de microalgues *Chlorelle pyrenoidosa* et *Chlorococcum*, sp

IV. 5. 3 Analyse et résultat :

Le tableau et les courbes représentent les résultats les plus importants obtenus grâce au traitement :

Tableau IV-9: résume les caractéristiques des eaux usées brutes utilisées dans cette expérience.

Paramètres	Unité	Valeur
pH	/	7.05
T	C°	27.8
Turbidité	NTU	6.76
Résidu sec à 110°	mg/l	1600
DBO5	mg/l	70
Conductivité électrique	mS/cm	2.58
NO₂⁻	mg/l	0.06
DCO	mg/l	299.52
NH₄⁺	mg/l	0.56
Ortho-phosphate PO₄	ml/g	13.68
NO₃⁺	mg/l	2.7
Matières organiques	mg/l	34

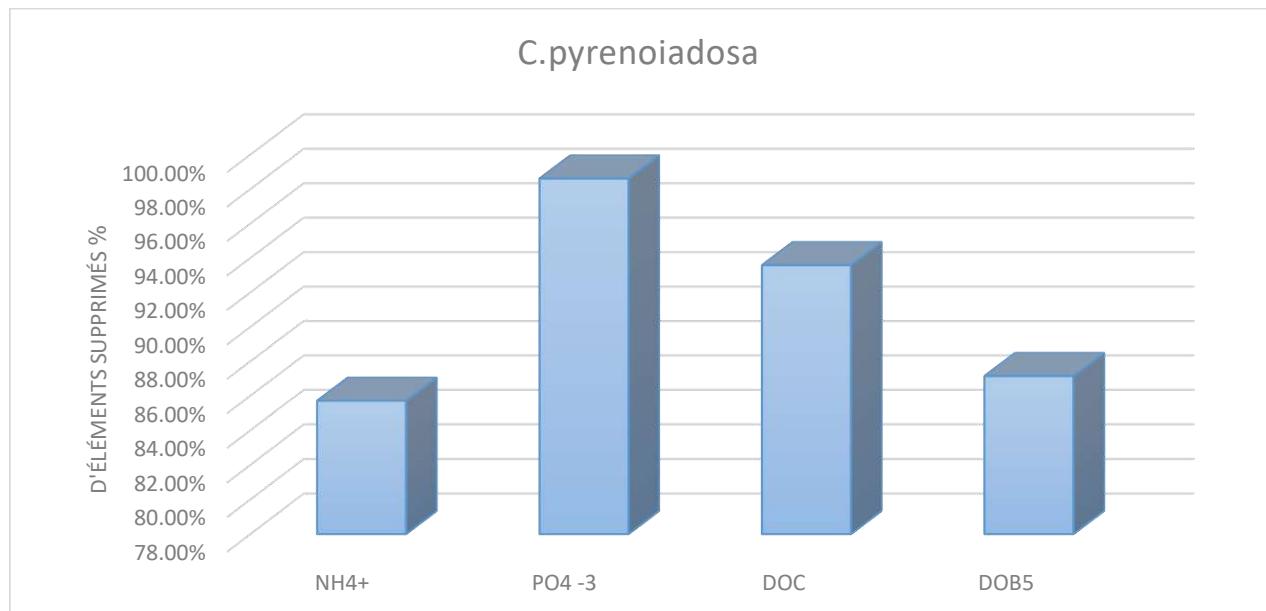


Figure IV-4: l'analyse de C.Pyrenoidosa

- Analyse graphique :

Le graphique suivant représente les colonnes graphiques de l'évolution du pourcentage d'élimination de certains éléments polluants présents dans l'eau de la station à l'aide de l'algue *C.pyrenoidosa*. Cette microalgue a éliminé le NH_4^+ de 85,71%, et le pourcentage d'élimination du PO_4^{3-} a atteint 98,61%. , et le pourcentage de réduction du DCO est d'environ 93,58 %, tandis que le DBO_5 est de 87,14% .

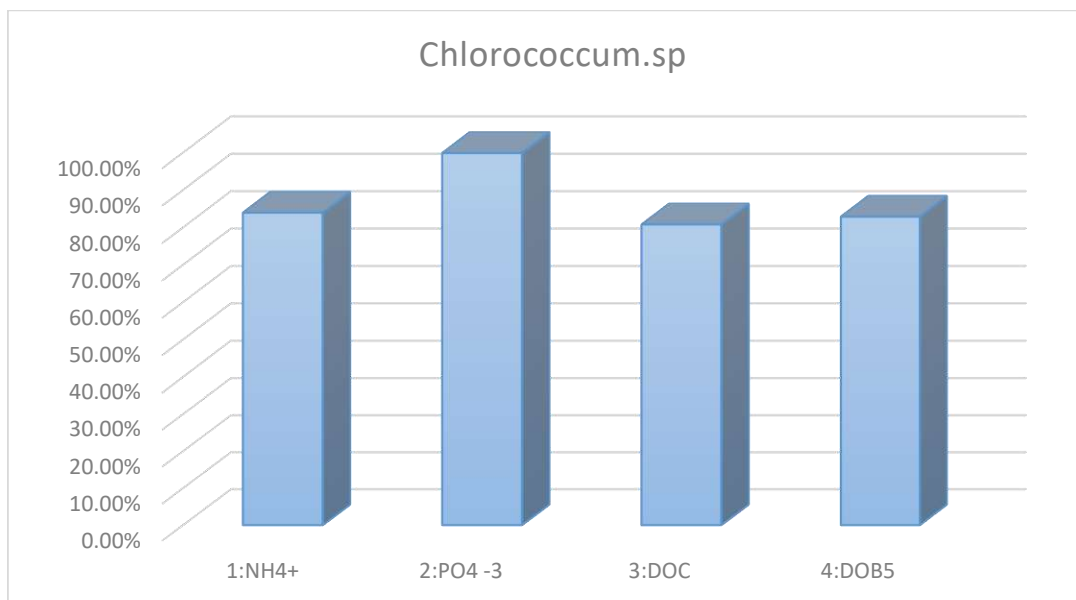


Figure IV-5: l'analyse de Chlorococcum.sp

- Analyse graphique :

Le graphique suivant représente les diagrammes à barres de l'évolution du pourcentage d'élimination de certains éléments polluants présents dans l'eau de la station à l'aide de l'algue *Chlorococcum, sp*. Cette microalgue a éliminé le NH_4^+ de 83,92 %, et le pourcentage d'élimination du PO_4^{3-} était de 99,88. %. Le pourcentage de réduction de la DCO est d'environ 80,76 %, tandis que le pourcentage de réduction du DOB_5 est d'environ 82,85 %.

On constate qu'en supprimant les éléments (DOB_5 , DCO, NH_4^+), l'algue *C.pyrenoidosa* était meilleure que *Chlorococcum, sp*. tandis qu'en supprimant PO_4^{3-} , il y avait une légère différence entre les proportions d'algues. Nous constatons que les algues *C.pyrenoidosa* se débarrassent mieux des contaminants existants.

IV. 6 Évaluation de l'efficacité du traitement des eaux usées par les microalgues :

Des études antérieures ont montré la capacité des microalgues (*Chlorella pyrenoidosa*, *Lyngbya*, *Chlorella*, sp, *Chlorophytae*, *Microcystis aeruginosa*, *Hapalosiphon*) à purifier les eaux usées des polluants organiques et des éléments nocifs (DBO, DCO, TDS, TSS, TS, NT, PT), et certains. Notre technique de marquage des métaux lourds dans l'eau a permis d'évaluer les niveaux auxquels chaque type d'algues étudiées pouvait être absorbé. Cependant, ce n'est pas une solution permanente pour le traitement des eaux usées en raison des changements de température, de la contamination chimique et des bactéries nocives. Ce qui réduit son efficacité en tant que solution permanente pour le traitement des eaux usées.

Le tableau **Tableau IV 10** ci-dessus résume les études bibliographiques

Chapitre V Étude et potentiel applications dans le sud algérien

Tableau IV 10: les études bibliographiques

	Nom du chercheur	Titre de l'étude	Le but	Les résultats
l'étude1	Mr. Abdellatif RAHMANI	Traitement des eaux produites de pétrole (EPP) par des microalgues et études des procédés de récupération de la biomasse	Évaluation de l'efficacité des microalgues utilisant la souche <i>C. Pyrenoidosa</i> dans le traitement de l'eau produite de pétrole (EPP)	Les traitements à base de <i>C. pyrenoidosa</i> ont montré une efficacité d'élimination élevée pour les éléments nutritifs et les métaux lourds
l'étude2	Ahmed I.abdullah Alallawi Waleed M. Sh. Alabdraba	Traitement de l'eau du journal désinfecté en utilisant deux types d'algues <i>Chlorella</i> , <i>Lyngobia</i> , sp	L'étude vise à réduire les niveaux de polluants du milieu aquatique grâce au phytoplancton (algues).	Les deux mousses poussent mieux à 22°C qu'à 32°C. Avec une efficacité acceptable pour éliminer les polluants de l'eau
l'étude3	Hamad Mohsen Athbi & Sabah Nahi Nasser & Abdlwahab Risan Eyal	Le rôle de certaines algues bleu-vert dans le traitement biologique de certains éléments métalliques lourds	Connaître l'efficacité des algues <i>M. aeruginosa</i> et <i>H.aureus</i> et leur capacité à biotraitier certains éléments métalliques lourds et à les utiliser comme étape supplémentaire dans les stations d'épuration des eaux contaminées.	<i>M. aeruginosa</i> est plus efficace pour éliminer le cadmium tandis que <i>H. aureus</i> est plus efficace pour éliminer le plomb
l'étude4	Siham Dahmani & Djamel Zerrouki & Luveshan Ramanna Ismail & Rawat Faizal Bux	Culture de <i>Chlorella pyrenoidosa</i> dans des étangs extérieurs à ciel ouvert utilisant les eaux usées domestiques comme milieu dans les zones désertiques arides	Culture de <i>Chlorella pyrenoidosa</i> dans les eaux usées secondaires pour évaluer ses capacités d'élimination des nutriments	Les résultats ont montré le potentiel d'élimination des nutriments par les microalgues cultivées dans les eaux usées secondaires des régions arides.
l'étude5	M. Bouchentouf Mohammed & M. Abdarraahmane Moussa	Traitement des eaux usées par les microalgues	étudier la culture de différentes souches microalgales dans les eaux usées domestiques provenant du Ksar de M'raguen Adrar, ainsi, l'évaluation des taux d'élimination des matières polluantes existant dans ces eaux usées	L'efficacité de l'élimination de certains éléments contaminés a été réalisée par <i>C. pyrenoidosa</i> . En plus de la souche, <i>Chlorococcum</i> , sp est particulièrement bon pour <i>C. pyrenoidosa</i>

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

Les microalgues occupent une place majeure dans l'écosystème aquatique car elles jouent un rôle efficace dans l'élimination des polluants des eaux usées. La technologie de traitement des eaux usées à l'aide de microalgues fait l'objet d'une grande attention en raison de leur capacité naturelle et de leur capacité. Elle produit de la biomasse et est une source de nombreux bioproduits, comme les biocarburants. De plus, elle constitue une étape prometteuse dans la réduction de la pollution et du réchauffement climatique résultant des combustibles fossiles.

Les résultats obtenus de cette étude montrent le type de microalgues adaptées au sud de l'Algérie et leur efficacité en termes d'élimination des contaminants qui peuvent être disponibles dans ces eaux :

- Les résultats de l'étude ont montré que la culture de microalgues (*Chlorella pyrenoidosa*-*Lyngbya*, sp-*Chlorophyceae*-*M.aeruginosa*-*H.aureus*) est très efficace pour éliminer les contaminants, et *Chlorella pyrenoidosa* a prouvé son efficacité dans la purification des eaux usées domestiques et industrielles.
- Les microalgues présentent d'autres avantages : une partie importante de leur biomasse peut être produite comme sous-produit après le traitement de l'eau et également réduire les émissions de combustibles fossiles en produisant des biocarburants.
- Les microalgues ont un environnement de croissance particulier, car chaque type de microalgue pousse dans une eau qui lui convient en termes de caractéristiques et de facteurs naturels qui l'entourent.

Grâce aux travaux effectués, les futurs chercheurs dans ce domaine pourront suivre les recommandations suivantes ;

Choisissez d'autres variétés et plantez-les au champ.

Concevoir des systèmes hautement efficaces pour accélérer le traitement et fournir des conditions de croissance plus rapides.

Apporter des ajustements à la conception du système ou aux conditions de fonctionnement si nécessaire Élargir la portée de l'exploitation de la biomasse

RÉFÉRENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- [1] N. J. Falizi, M. C. Hacifazlıoğlu, I. Parlar, N. Kabay, T. Ö. Pek, and M. Yüksel, *Journal of water process engineering*, vol. 22, pp. 103-108, 2018.
- [2] F. Wollmann *et al.*, "Microalgae wastewater treatment: Biological and technological approaches," *Engineering in Life Sciences*, vol. 19, no. 12, pp. 860-871, 2019.
- [3] S. Y. A. Siddiki *et al.*, "Microalgae biomass as a sustainable source for biofuel, biochemical and biobased value-added products: An integrated biorefinery concept," *Fuel*, vol. 307, p. 121782, 2022.
- [4] S. S. Ali *et al.*, "Recent advances in wastewater microalgae-based biofuels production: A state-of-the-art review," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 13253-13280, 2022.
- [5] N. Pragya, K. K. Pandey, and P. Sahoo, "A review on harvesting, oil extraction and biofuels production technologies from microalgae," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 24, pp. 159-17.2013, 2013.
- [6] P. Zhao *et al.*, "Agar extraction and purification of R-phycoerythrin from *Gracilaria tenuistipitata*, and subsequent wastewater treatment by *Ulva prolifera*," *Algal research*, vol. 47, p. 101862, 2020.
- [7] S. F. Mohsenpour, S. Hennige, N. Willoughby, A. Adeloye, and T. Gutierrez, "Integrating micro-algae into wastewater treatment: A review," *Science of the Total Environment*, vol. 752, p. 142168, 2021.
- [8] F. Rejsek, *Analyse des eaux: Aspects réglementaires et techniques*. Centre régional de documentation pédagogique d'Aquitaine, 2002.
- [9] G. Grosclaude, *L'eau: Tome 2: Usages et polluants*. Editions Quae, 1999.
- [10] R. Salghi, "Différentes filières de traitement des eaux, ed univ IZ Rabat," 2001.
- [11] J. Rodier, "L'analyse de l'eau naturelle, eaux résiduaires, eaux de mer. 8ème Edition DUNOD technique," ed: Paris, 2005.
- [12] N. Noureddine, "Contribution à la réduction du Cr (VI) par voie biologique. Effet de l'azote et du carbone," Université Mohamed Boudiaf des Sciences et de la Technologie-Mohamed Boudiaf
- [13] S. Baumont, J. Camard, A. Lefranc, and A. Franconi, "Réutilisation des eaux usées épurées: risques sanitaires et faisabilité en Île-de-France. Rapport ORS. France. 220 p. 5," ed, 2004.

Références bibliographiques

- [14] J. Faby and F. Brissaud, "L'utilisation des eaux usées épurées en irrigation," *Office International de l'eau*, vol. 76, 1997.
- [15] D. Xanthoulis, "Valorisation agronomique des eaux usées des industries agro-alimentaires," 1993.
- [16] G. Martin, "Le problème de l'azote dans les eaux, Ed. Technique et Documentation," *Lavoisier, Paris*, pp. 231-246, 1979.
- [17] S. Njimat, H. Griou, M. Doubi, M. Aboulouafa, and A. S. IBN, "Fertilizing power study of wastewater from Dar El Gueddari WWTP grain corn case," *Indian Journal of Environmental Protection*, vol. 39, no. 9, pp. 839-843, 2019.
- [18] T. Asano, *Wastewater reclamation and reuse: water quality management library*. Crc Press, 1998.
- [19] D. Gaujous, *La pollution des milieux aquatiques: aide-mémoire*. Technique & Documentation-Lavoisier, 1995.
- [20] J. Rodier, C. Geoffray, and L. Rodi, *L'analyse de l'eau: eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer: chimie, physico-chimie, bacteriologie, biologie*. Dunod., 1996.
- [21] M. Dakhlaoui, D. Gaujous, G. Raimbault, and J.-P. Tabuchi, "Water diffusion device design in reservoir structures," *Water Science and Technology*, vol. 32, no. 1, pp. 71-78, 1995.
- [22] N. GHERARA, "Étude des performances de la station d'épuration des eaux usées de la région HAOUD BERKAOUI," 2019 .
- [23] A. Youbi, A. Houilia, B. Soumati, H. Berrebbah, M .R. Djebbar, and L. Souiki, "Assessment of the physico-chemical and bacteriological quality of the surface waters of wadis" Boukhmira, Meboudja and Seybouse" used in irrigation in the north-east of Algeria," *Studia Universitatis Vasile Goldis Seria Stiintele Vietii (Life Sciences Series)*, vol. 28, no. 2, 2018.
- [24] D. Belghyti *et al.*, "Caractérisation physico-chimique des eaux usées d'abattoir en vue de la mise en œuvre d'un traitement adéquat: cas de Kénitra au Maroc," *Afrique Science: Revue Internationale des Sciences et Technologie*, vol. 5, no. 2, 2009.
- [25] M. Shah, H. N. Hashmi, A. Ali, and A. R. Ghumman, "Performance assessment of aquatic macrophytes for treatment of municipal wastewater," *Journal of environmental health science and engineering*, vol. 12, pp. 1-12, 2014.
- [26] I. Rezzouk and A. E. Zazoua, "Utilisation des polysaccharides de figue de Barbarie pour l'analyse qualitative et quantitative du Cadmium dans les eaux potables," Université de Jijel, 2019 .

Références bibliographiques

- [27] A. S. Amer, O. Zimmo, and J. Harb" «Faculty of Graduate Studies Master Program in Water and Environmental Sciences “Reuse of reclaimed wastewater to irrigate corns designated for animal feeding”.”
- [28] W. Q. Betancourt and C. P. Gerba, "Rethinking the significance of reovirus in water and wastewater," *Food and environmental virology*, vol. 8, pp. 161-173, 2016.
- [29] C. Campos, "New perspectives on microbiological water control for wastewater reuse," *Desalination*, vol. 218, no. 1-3, pp. 34-42, 2008.
- [30] G. Abdelkader, "Epuration biologique de l'eau urbaine, tome-1 OPU," ed: Alger, 1984.
- [31] Petithory, P Ambroise-Thomas, J De Loye, H Pelloux, A Goullier-Fleuret, M Milgra Bulletin of the World Health organization 1996
- [32] S. Ilcan and L. Phillips, "Making food count: expert knowledge and global technologies of government," *Canadian Review of Sociology/Revue canadienne de sociologie*, vol. 40 ‘no. 4, pp. 441-461, 2003.
- [33] S. M. ElAmine, "Epuration des eaux usées du centre culturel islamique—
Sidi Okba- par un filtre de macrophyte".
- [34] S. Amir, "Contribution à la valorisation de boues de stations d'épuration par compostage: devenir des micropolluants métalliques et organiques et bilan humique du compost," 2005 .
- [35] A. B. Cayouette, "Identification et quantification des bioaérosols bactériens et des gènes de résistance aux antibiotiques émis par des bassins extérieurs de traitement des eaux usées," Université Laval, 2023 .
- [36] D. B. MADANI, "Traitement des eaux usées".
- [37] M. Zeghoud, "Etude de système d'épuration des eaux usées urbaines par lagunage naturel de village de Méghibra," *Mémoire de master, Université d'el-Oued*, p. P20, 2014.
- [38] R. HABIB and O. EL RHAZI, "Impact sanitaire de la réutilisation des eaux usées," *Project de Fin d'études de Licence-SV, Université Cadi Ayyad–Marrakech (Maroc)*, 2007.
- [39] N. Abdel-Raouf, A. Al-Homaidan, and I. Ibraheem, "Microalgae and wastewater treatment," *Saudi journal of biological sciences*, vol. 19, no. 3, pp. 257-275, 2012.
- [40] C. Hoek, D. Mann, and H. M. Jahns, *Algae: an introduction to phycology*. Cambridge university press, 1995.
- [41] T. Ainane, "Valorisation de la biomasse algale du Maroc :Potentialités pharmacologiques et Applications environnementales, cas des algues brunes *Cystoseira tamariscifolia* et

Références bibliographiques

- Bifurcaria bifurcata," Faculté des Sciences Ben M'sik Université Hassan II Casablanca, 2011 .
- [42] C. Dejoye, "Eco-extraction et analyse de lipides de micro-algues pour la production d'algo-carburant," 2013: Avignon .
- [43] Y. Chisti, "Biodiesel from microalgae," *Biotechnology advances*, vol. 25, no. 3, pp. 294-306, 2007.
- [44] O. Perez-Garcia, F. M. Escalante, L. E. De-Bashan, and Y. Bashan, "Heterotrophic cultures of microalgae: metabolism and potential products," *Water research*, vol. 45, no. 1, pp. 11-36, 2011.
- [45] G. E. Fogg, "The metabolism of algae," (*No Title*), 1953.
- [46] A. Benali and M. O. Bourai, "Les microalgues: source d'énergie renouvelable pour la production de biomasse et biodiesel," 2020 .
- [47] A. Laskin and H. Lechevalier, "CRC handbook of microbiology. v. 1: Bacteria.-v. 2: Fungi, algae, protozoa and viruses.-v. 3-4: Microbial composition.-v. 5: Microbial products.-v. 6 : Growth and metabolism.-v. 7: Microbial transformation," 1977.
- [48] R. Mitchell, "Introduction to environmental microbiology," (*No Title*), 1974.
- [49] M. V. Vieira, L. M. Pastrana, and P. Fuciños, "Microalgae encapsulation systems for food, pharmaceutical and cosmetics applications," *Marine drugs*, vol. 18, no. 12, p. 644, 2020.
- [50] S. W. Wright and S. Jeffrey, "Pigment markers for phytoplankton production," *Marine organic matter: biomarkers, isotopes and DNA*, pp. 71-104, 2006.
- [51] B. Sialve and J.-P. Steyer, "Les microalgues, promesses et défis," *Innovations Agronomiques*, vol. 26, pp. 25-39, 2013.
- [52] M. Ceol, "Regulation of chlorophyll synthesis in Chlamydomonas reinhardtii: the role of FLP and GUN4," University of Geneva, 2009 .
- [53] A. Sayegh, "Dérivation des électrons photosynthétiques par des quinones sur organisme entier: le cas de Chlamydomonas reinhardtii," Sorbonne université, 2018 .
- [54] L. Sirois, "Changements physiologiques chez les microalgues vertes menant à la biosynthèse de caroténoïdes " Université du Québec à Montréal, 2013 .
- [55] M. Abdennadher, "Étude Taxonomique et Écophysiologique des dinoflagellés toxiques du Golfe de Gabès: Alexandrium minutum, Prorocentrum lima, Coolia spp. & Ostreopsis ovata," Université de Sfax, Faculté des Sciences,(Tunisie), 2014 .

- [56] M. Bouchentouf, M. Abdarrahmene, and S. Dehmani, "Traitement des eaux usées par les microalgues," Université Ahmed Draia-Adrar, 2021 .
- [57] M. Sadi, "Les micro algues: un défi prometteur pour des biocarburants propres," *Revue Des Energies Renouvelables SIENR*, vol. 12, pp. 195-202, 2012.
- [58] R. Harun, M. Singh, G. M. Forde, and M. K. Danquah, "Bioprocess engineering of microalgae to produce a variety of consumer products," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 14, no. 3, pp. 1037-1047, 2010.
- [59] J. Park, R. Craggs, and A. Shilton, "Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production," *Bioresource technology*, vol. 102, no. 1, pp. 35-42, 2011.
- [60] H. Desmorieux and F. Hernandez, "Biochemical and physical criteria of Spirulina after different drying processes," in *Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS), B*, 2004, pp. 900-907 .
- [61] E. G. d. Oliveira, G. S. d. Rosa, M. A. d. Moraes, and L. A. d. A. Pinto, "Characterization of thin layer drying of Spirulina platensis utilizing perpendicular air flow," *Bioresource technology*, vol. 100, no. 3, pp. 1297-1303, 2009.
- [62] L. Zhu *et al.*, "Recent research and development status of laser cladding: A review," *Optics & Laser Technology*, vol. 138, p. 106915, 2021.
- [63] L. B. Sukla, N. Pradhan, S. Panda, and B. K. Mishra, *Environmental Microbial Biotechnology*. Springer, 2015.
- [64] G. A. Lutz, A. Ciurli, C. Chiellini, F. Di Caprio, A. Concas, and N. T. Dunford, "Latest developments in wastewater treatment and biopolymer production by microalgae," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 9, no. 1, p. 104926, 2021.
- [65] J.-P. Cadoret and O. Bernard, "La production de biocarburant lipidique avec des microalgues: promesses et défis," *Journal de la Société de Biologie*, vol. 202, no. 3, pp. 201-211, 2008.
- [66] D. Ghobrani, "Optimisation de la production de biomasse chez Chlorella vulgaris cultivée dans des eaux usées laitières (lactosérum des fromageries industrielles et ses dérivés) pour la production d'algo-carburant," Université Mouloud MAMMERI Tizi-Ouzou, 2022 .
- [67] J. Milano *et al.*, "Microalgae biofuels as an alternative to fossil fuel for power generation," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 58, pp. 180-197, 2016.
- [68] A. N. Yasmine, "Production en masse de microalgues: optimisation des paramètres physico-chimiques," 2019 .

Références bibliographiques

- [69] S. A. Razzak, S. A. M. Ali, M. M. Hossain, and H. deLasa, "Biological CO₂ fixation with production of microalgae in wastewater—a review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 76, pp. 379-390, 2017.
- [70] G. Huang, F. Chen, D. Wei, X. Zhang, and G. Chen, "Biodiesel production by microalgal biotechnology," in *Renewable Energy*: Routledge, 2018, pp. Vol3_378-Vol3_395.
- [71] T. M. Mata, A. A. Martins, and N. S. Caetano, "Microalgae for biodiesel production and other applications: a review," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 14, no. 1, pp. 217-232, 2010.
- [72] R. Soto-Ramírez, M.-G. Lobos, O. Córdova, P. Poirrier, and R. Chamy, "Effect of growth conditions on cell wall composition and cadmium adsorption in *Chlorella vulgaris*: A new approach to biosorption research," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 411, p. 125059, 2021.
- [73] S. Mustafa, H. N. Bhatti, M. Maqbool, and M. Iqbal *Journal of Water Process Engineering*, vol. 41, p. 102009, 2021.
- [74] D. L. Sutherland and P. J. Ralph, "Microalgal bioremediation of emerging contaminants- Opportunities and challenges," *Water research*, vol. 164, p. 114921, 2019.
- [75] A. Abdelfattah *et al.*, "Microalgae-based wastewater treatment: Mechanisms, challenges, recent advances and future prospects," *Environmental Science and Ecotechnology*, vol. 13, p. 100205, 2023.
- [76] EI El-Aswar, H Ramadan, H Elkik, AG Taha *Journal of Environmental Management*, 2022.
- [77] L. Leng *et al.*, "Co-culture of fungi-microalgae consortium for wastewater treatment: A review," *Bioresource technology*, vol. 330, p. 125008, 2021.
- [78] C. Liu, S .Li, and F. Zhang, "The oxygen transfer efficiency and economic cost analysis of aeration system in municipal wastewater treatment plant," *Energy Procedia*, vol. 5, pp. 2437-2443, 2011.
- [79] M. A. Alam and Z. Wang, *Microalgae biotechnology for development of biofuel and wastewater treatment*. Springer, 2019.
- [80] B. Molinuevo-Salces, B. Riaño, D. Hernández, and M. Cruz García-González, "Microalgae and wastewater treatment: advantages and disadvantages," *Microalgae biotechnology for development of biofuel and wastewater treatment*, pp. 505-533, 2019.
- [81] M. Dębowski, M. Zieliński, J. Kazimierowicz, N. Kujawska, and S. Talbierz, *Sustainability*, vol. 12, no. 23, p. 9980, 2020.

Références bibliographiques

- [82] E. J. Olguín, "Dual purpose microalgae–bacteria-based systems that treat wastewater and produce biodiesel and chemical products within a Biorefinery," *Biotechnology advances*, vol. 30, no. 5, pp. 1031-1046, 2012.
- [83] I. Rawat, R. R. Kumar, T. Mutanda, and F. Bux, "Dual role of microalgae: phycoremediation of domestic wastewater and biomass production for sustainable biofuels production," *Applied energy*, vol. 88, no. 10, pp. 3411-3424, 2011.
- [84] A. Guldhe, B. Singh, I. Rawat, K. Ramluckan, and F. Bux, "Efficacy of drying and cell disruption techniques on lipid recovery from microalgae for biodiesel production," *Fuel*, vol. 128, pp. 46-52, 2014.
- [85] A. Melis and T. Happe, "Hydrogen production. Green algae as a source of energy," *Plant physiology*, vol. 127, no. 3, pp. 740-748, 2001.
- [86] M. T. Nguyen, S. P. Choi, J. Lee, J. H. Lee, and S. J. Sim, "Hydrothermal acid pretreatment of *Chlamydomonas reinhardtii* biomass for ethanol production," *J Microbiol Biotechnol*, vol. 19, no. 2, pp. 161-166, 2009.
- [87] A. F. M. Udaiyappan, H. A. Hasan, M. S. Takriff, and S. R. S. Abdullah, "A review of the potentials, challenges and current status of microalgae biomass applications in industrial wastewater treatment," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 20, pp. 8-21, 2017.
- [88] F. Guihéneuf and D. B. Stengel, *Algal research*, vol. 10, pp. 152-163, 2015.
- [89] F. Gironi and V. Piemonte, "Bioplastics and petroleum-based plastics: strengths and weaknesses," *Energy sources, part a: recovery, utilization, and environmental effects*, vol. 33, no. 21, pp. 1949-1959, 2011.
- [90] M. Eriksen *et al.*, "Plastic pollution in the world's oceans: more than 5 trillion plastic pieces weighing over 250,000 tons afloat at sea," *PloS one*, vol. 9, no. 12, p. e111913, 2014.
- [91] A. Rahmani, "Traitement des eaux produites de pétrole (EPP) par des microalgues et études des procédés de récupération de la biomasse," DJAFER Lahcène/ZERROUKI Djamal, 2019 .
- [92] "Treatment the Disinfected Dairy water by using two type of Algae *Chlorella*, *Lyngbya*," *Muthanna Journal of Engineering and Technology (MJET)*, vol. 5, no. 2, 2017".
- [93] A. M. Athbi, S. N. Nasir, and A.-W. R. Ayyal, "The role of some blue green algae on the bioremediation of some heavy mineral elements," *Journal of Education for Pure Science*, vol. 5, no. 2, 2015.

Références bibliographiques

- [94] S. Dahmani, D. Zerrouki, L. Ramanna, I. Rawat, and F. Bux, "Cultivation of *Chlorella pyrenoidosa* in outdoor open raceway pond using domestic wastewater as medium in arid desert region," *Bioresource Technology*, vol. 219, pp. 749-752, 2016.

RÉSUMÉ

الملخص :

تعتبر المياه من أهم الموارد الطبيعية على وجه الأرض، إذ تلعب دوراً حيوياً في بقاء الحياة، ويقوم الإنسان باستغلالها واستخدامها بطرق عديدة، مما يلعب دوراً كبيراً في تلوثها بسبب الصناعات والأنشطة الزراعية. والنفايات المنزلية. هناك العديد من الطرق لمعالجة مياه الصرف الصحي، لذلك يلجأ العديد من الباحثين إلى طرق معالجة طبيعية وفعالة من حيث التكلفة، حيث أن تنقية المياه بالطحالب الدقيقة هي وسيلة فعالة وتساهم بشكل كبير في عملية التنقية، لأن الطحالب الدقيقة تمتص المواد الضارة من المياه وتستخدمها الغذاء لنموهم. وكجزء من هذا العمل، تهدف دراستنا إلى العثور على أنواع الطحالب الأكثر ملائمة لمعالجة مياه الصرف الصحي في جنوب الجزائر، حيث أظهرت معظم الدراسات أن طحالب شلوريلا بيرينويدوسا متوافقة بشكل كبير مع معالجة مياه الصرف الصحي في منطقتنا.

الكلمات المفتاحية: مياه الصرف الصحي، معالجة المياه، الطحالب الدقيقة

Résumé :

L'eau est l'une des ressources naturelles les plus importantes sur terre, car elle joue un rôle vital dans la survie de la vie, et il existe de nombreuses façons que les humains exploitent et utilisent, qui jouent un rôle majeur dans leur pollution par les activités industrielles et agricoles. et les ordures ménagères. Il existe de nombreuses méthodes de traitement des eaux usées, c'est pourquoi de nombreux chercheurs ont recours à des méthodes de traitement naturelles et rentables, car la purification de l'eau avec des microalgues est une méthode efficace et contribue de manière significative au processus de purification, car les microalgues absorbent les substances nocives de l'eau et les utilisent comme nourriture pour leur croissance. Dans le cadre de ce travail, notre étude vise à trouver les types d'algues les plus adaptés au traitement des eaux usées dans le sud de l'Algérie, où la plupart des études ont montré que les algues de type *Chlorella pyrenoidosa* sont hautement compatibles avec notre zone de traitement des eaux usées.

Mots clés: eau usée, traitement d'eau, microalgue

Abstract:

Water is one of the most important natural resources on earth, as it plays a vital role in the survival of life, and there are many ways that humans exploit and use, as it plays a major role in its pollution from industrial and agricultural activities. And household waste. There are many wastewater treatment methods, and for this reason many researchers resort to natural and cost-effective treatment methods, as microalgae water purification is an effective method and contributes significantly to the purification process, as microalgae absorb harmful substances from water and use them as food for their growth. As part of this work, our study aims to find the most suitable types of algae for wastewater treatment in southern Algeria, where most studies have shown that *chlorella pyrenoidosa*-like algae are highly compatible with our wastewater treatment area.

Keywords: wastewater, water treatment, microalgae