اجلمهورية اجلزائرية الدميقراطية الشعبية
République algérienne démocratique populaire
وزارة التعليم العايل والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche scientifique
املدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيات املتقدمة
Ecole Nationale Supérieure des Technologies Avancées

Département du second cycle

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

MASTER

Filière

Génie des procédés

- Spécialité -

Traitement des eaux

- Thème -

La purification de l'eau par les algues

Réalisé par : **CHEMLI Youcef**

Les membres de Jury :

Mme Smail Fatima	MAA	**Présidente**
Mme CHEIKH Assira	MCB	**Examinatrice**
Pr ZEMMOURI Hassiba	Prof	**Promotrice**

Alger, le 30/06/2024

Année universitaire 2023 – 2024

Dédicace

À mes très chers parents et à ma famille bien-aimée, Vous qui m'avez inculqué que la vraie réussite se trouve dans la constance et l'honnêteté. Vos expériences et vos enseignements continuent d'être ma source d'inspiration quotidienne. Vous avez été mon havre de paix, ma source de joie et mon refuge dans les moments d'incertitude et d'épuisement. Votre soutien indéfectible a été le pilier sur lequel j'ai pu m'appuyer tout au long de ce parcours. À mes amis précieux, votre amitié a été un trésor inestimable durant cette aventure. Vos encouragements et votre présence ont illuminé même les jours les plus sombres. Je dédie également ce travail à tous ceux qui, dans l'ombre, ont cru en moi, m'ont offert des mots d'encouragement ou ont simplement espéré ma réussite. Votre soutien silencieux a été une force motrice. C’est avec une gratitude infinie que je partage cette réalisation avec vous tous. Ce mémoire est le fruit de vos encouragements, de votre amour et de votre confiance en moi. Merci d'avoir été les étoiles qui ont guidé mon chemin vers l'accomplissement de ce projet.

Youcef.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à ma promotrice de mémoire, la Professeure H. Zemmouri, pour son encadrement précieux et leur soutien constant tout au long de ce travail. Ses conseils avisés, son expertise et ses encouragements ont été essentiels à la réalisation de ce mémoire.

الملخص:

يعد التلوث البيئي الناجم عن التغير التكنولوجي إحدى المشاكل الرئيسية في هذا القرن، وفي مواجهته يبرز دمج الطحالب الدقيقة في معالجة المياه كحل مستدام لتلبية المعايير البيئية المتغيرة باستمرار. وبالإضافة إلى قدرتها على التراكم الحيوي للمعادن الثقيلة وبعض المركبات العضوية السامة، دون إحداث تلوث ثانوي، أثبتت أنظمة معالجة المياه بالطحالب فعاليتها مثل العمليات التقليدية. سيسلط هذا االستعراض الضوء على الدور ألالساسي للطحالب الدقيقة في معالجة المياه، بهدف تحقيق االستدامة البيئية.

الكلمات الرئيسية: الطحالب الدقيقة؛ المياه؛ المعالجة؛ التراكم الحيوي.

Abstract :

Environmental pollution caused by technological change is one of the major problems of this century, and integrating microalgae into water treatment is emerging as a sustainable solution to meet constantly evolving environmental standards. In addition to their ability to bioaccumulate heavy metals and certain toxic organic compounds, without generating secondary pollution, algal water treatment systems have proved to be as effective as conventional processes. This review will highlight the essential role of microalgae in water treatment, with a view to environmental sustainability.

Key words: *microalgae; water x; treatment; bioaccumulation.*

Résumé :

La pollution de l'environnement due à l'évolution technologique est l'un des problèmes majeurs de ce siècle, face auquel l'intégration des microalgues dans le traitement des eaux s'impose comme une solution durable pour répondre aux normes environnementales en constante évolution. En plus de leur capacité à bioaccumuler les métaux lourds et certains composés organiques toxiques, sans générer de pollution secondaire, les systèmes de traitement des eaux par les algues se sont révélés aussi efficaces que les procédés conventionnels. Cette revue mettra en évidence le rôle essentiel des microalgues dans le traitement des eaux, dans une optique de durabilité environnementale.

Mots clés : *microalgues ; eaux ; traitement ; bioaccumulation.*

Table des matières

Introduction générale *1*
Introduction 2
Chapitre I : Généralités sur les eaux usées *3*
1.1 Définition des eaux usées 4
1.2 Origine et composition des eaux usées 4
1.3 Etapes de traitement des eaux usées 5
A. Prétraitement physique 5
B. Traitement primaire 5
C. Principe du traitement physico-chimique 6
D. Traitement biologique 6
E. Traitement complémentaire (Tertiaire) 8
Chapitre II : Traitement des eaux usées par l'utilisation des algues *9*
2.1 Introduction 10
2.2 Généralités sur les algues 10
2.2.1 Définition des algues 10
2.2.2 Classification des algues 10
2.2.3 L'utilisation des algues 13
2.2.4 Caractéristiques des algues vertes 14
2.3 Traitement des eaux usées par les algues 14
2.4 Réduction de la DBO/DCO 15
2.5 Enlèvement de nutriments N et P 15
2.6 Enlèvement des métaux lourds 16
Conclusion générale *17*
Références bibliographiques 19

Liste des figures

Figure I.1 : Représentation schématique du traitement primaire des eaux brutes

Figure I.2 : Illustration du traitement physico-chimique

Figure II.3 : Le principe du lagunage naturel.

Figure III.4 : Traitement des boues activées.

Figure IV.5 : Traitement biologique de l'eau brute.

Figure V.6 : Traitement tertiaire des eaux usées

Figure II.1 : Phytoplancton-Les dinoflagellés

Figure II.2 : Chrysophytes (Algues Dorées)

Figure II.3 : Biofilm de diatomées

Figure II.4 : Les Euglénophytes

Figure II.5 : Les Rhodophycées (Algues Rouges)

Figure II.6 : Les Phéophycées (Algues Brunes)

Figure II.7 : Recyclage des eaux usées par un mur d'algues

Liste des tableaux

Tableau VI.1 : Les différentes origines des eaux usées ainsi que leurs compositions

Tableau II.1 : Les différentes utilisations des algues

Liste des abréviations

CAP : Charbon Actif en Poudre.

DBO : Demande Biochimique en Oxygène.

DCO : Demande Chimique en Oxygène.

DNF : Déphosphatation Biologique par Déplacement Nutritif.

MES : Matières En Suspension.

PFAA : Perfluoroalkylés.

UV : Ultraviolets.

Introduction générale

Introduction

L'eau est une ressource naturelle absolument indispensable à la vie humaine, sa disponibilité et sa qualité varient grandement selon les régions du globe, certaines zones faisant face à une pénurie chronique tandis que d'autres souffrent d'une dégradation de la qualité liée à l'intensification des activités industrielles et anthropiques générant de nombreux rejets polluants dans les milieux aquatiques, entraînant ces dernières années une détérioration généralisée de la qualité des eaux dans le monde, avec des impacts néfastes sur les écosystèmes et la santé humaine. [1]

La sécheresse qui sévit actuellement en Afrique n'en est malheureusement que le dernier exemple lié au phénomène du stress hydrique. Un milliard de personnes n'ont pas suffisamment accès à l'eau potable, cinq millions (principalement des enfants) meurent chaque année de maladies véhiculées par l'eau et ces chiffres devraient augmenter. [2]

Les régions arides et semi-arides, comme l'Algérie, font face à une grave pénurie d'eau douce, une ressource naturelle très limitée dans ces zones. Les rares ressources en eau existantes sont gravement menacées par la pollution causée par les rejets d'eaux urbaines et industrielles, qui contiennent de nombreuses substances solides ou dissoutes ainsi que des micro-organismes pathogènes. Cette pollution dégrade la qualité de l'environnement dans son ensemble, entraînant l'eutrophisation des eaux, la toxicité pour la faune et la flore aquatiques, la contamination des nappes phréatiques et des risques sanitaires pour les populations. Face à cette situation préoccupante, une gestion durable des ressources en eau s'impose, passant par la réduction des rejets polluants, le traitement des eaux usées et une utilisation rationnelle de cette ressource vitale pour les générations futures. [3]

Le traitement des eaux usées est un processus complexe qui vise à purifier l'eau de manière à ce qu'elle puisse être soit réintroduite dans le milieu naturel. Ce processus fait appel à diverses techniques telles que la décantation, la filtration, la désinfection et le traitement biologique, permettant ainsi de réduire la charge polluante et de rendre l'eau propre à la consommation ou à la réutilisation. Le traitement des eaux usées joue un rôle essentiel dans la préservation de l'environnement et de la santé publique, en assurant un recyclage responsable de cette ressource précieuse [4]. Afin de réduire le niveau de contamination des eaux en métaux lourds et en microorganismes pour la rendre adéquate avec les normes de rejet ou utilisable en agriculture ou en industrie. Différentes méthodes sont utilisées telles que la méthode des boues activées, ainsi que l'utilisation des algues fixatrices qui procèdent à l'élimination de ces résidus. [5]

Chapitre I : Généralités sur les eaux usées

1.1 Définition des eaux usées

Une eau est considérée comme usée ou polluée lorsque ses propriétés physiques, chimiques et organoleptiques sont altérées de manière défavorable ou nocive, la rendant impropre à une utilisation normale (Dugniolle, 1980 ; Benneton, 1989). Cette modification est généralement le résultat direct ou indirect des activités humaines (Audic et Esser, 2006). Les eaux usées se caractérisent par une composition hétérogène, chargée de matières minérales et/ou organiques, en suspension ou en solution, dont certaines peuvent même présenter un caractère toxique (Bachi, 2010).

1.2 Origine et composition des eaux usées

Tableau VII.1 : Les différentes origines des eaux usées ainsi que leurs compositions

Type d'eaux usées	Origine	Composition
Eaux usées domestiques	Différents usages domestiques de l'eau	Pollution organique, eaux ménagères (salles de bains, cuisines) chargées de détergents, graisses, solvants, débris organiques, eaux vannes (rejets des toilettes) chargées de matières organiques azotées et germes fécaux [6]
Eaux usées industrielles	Activités industrielles	Matières organiques, azotées ou phosphorées, produits toxiques, solvants, métaux lourds, micropolluants organiques, hydrocarbures. Caractéristiques variables selon l'industrie [6]
Eaux agricoles	Activités agricoles	Engrais et pesticides
Eaux pluviales	Ruissellement des toitures, terrasses, parkings et voies de circulation	Lors de leur transit vers l'exutoire, les eaux pluviales peuvent se charger en : ➢ Matières polluantes solides (pour plus de 90%). ➢ Matières polluantes dissoutes : hydrocarbures, métaux lourds, pesticides, micropolluants (PFAA) [7]

1.3 Etapes de traitement des eaux usées

A. Prétraitement physique

Plusieurs traitements sont effectués après des prétraitements par dégrillage, le dessablage et le dégraissage. Parmi ces filières, on trouve :

B. Traitement primaire

Les traitements primaires des eaux usées, qui consistent en des procédés physiques ou physico-chimiques de décantation pour éliminer une partie des matières minérales et organiques en suspension (50 à 60 %), ne permettent qu'une épuration partielle et tendent à être complétés par des traitements secondaires, notamment lorsque l'élimination de la pollution azotée est nécessaire pour répondre aux exigences réglementaires. [8]

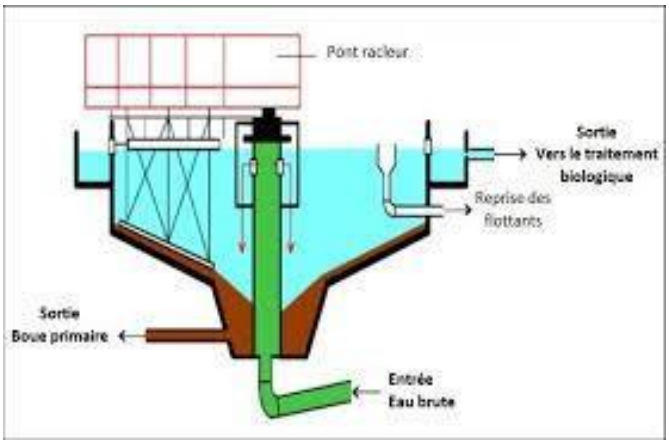


Figure VIII.1 : Représentation schématique du traitement primaire des eaux

C. Principe du traitement physico-chimique

Le traitement des eaux usées par procédé physico-chimique vise à l'élimination des MES. Cette étape comporte la coagulation, la floculation et la décantation. La coagulation consiste à agglomérer les colloïdes en ajoutant des sels de fer ou d'aluminium, tandis que la floculation et la décantation permettent de séparer les matières solides du liquide en injectant des agents floculants comme le charbon actif en poudre CAP. Bien que ces méthodes soient capables de gérer des variations importantes de la charge polluante, elles s'avèrent très coûteuses en fonction des adjuvants chimiques utilisés lors de l'exploitation. [9]

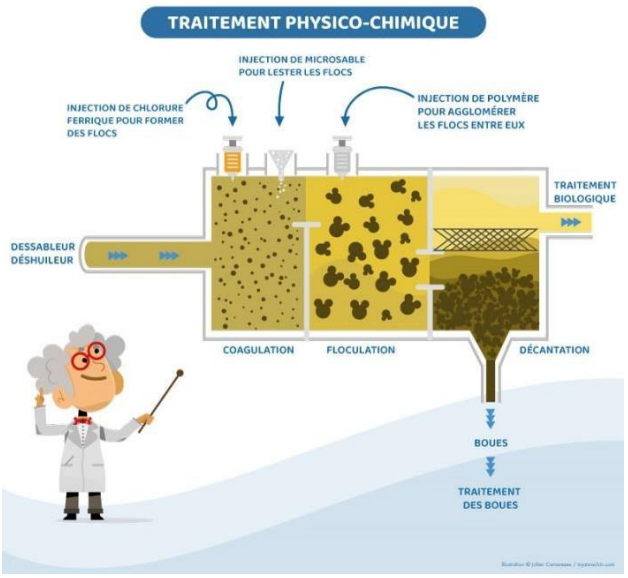


Figure I.2 : Illustration du traitement physico-chimique

D. Traitement biologique

Le traitement biologique des eaux usées, également appelé traitement par voie biologique, vise à éliminer les polluants dissous en introduisant des populations de micro-organismes capables de consommer les polluants organiques. Dans ce processus, il est essentiel de favoriser la croissance et le développement de la communauté bactérienne aérobie, qui utilise l'oxygène pour assurer le bon déroulement de leur activité métabolique. Il existe plusieurs types de traitements biologiques :

Lagunage naturel

Cette méthode consiste à stocker les eaux usées dans des bassins peu profonds appelés lagunes, où l'activité microbienne se déroule de manière naturelle, grâce à l'échange avec l'atmosphère

et la photosynthèse. Des aérateurs peuvent être utilisés pour brasser l'air et optimiser l'activité de la communauté bactérienne. Ce processus entraîne la formation de boues de lagunage au fond des bassins d'aération, qui sont ensuite récupérées.

Boues activées

Cette étape nécessite la présence de dioxygène (O_2), de bactéries et d'eaux usées dans des bassins d'aération. La sélection des espèces bactériennes se fait en fonction du type de polluant à éliminer (polluants à base de carbone, d'azote ou de phosphore). Les bactéries et leurs déchets métaboliques forment des "boues biologiques" dans un bassin appelé clarificateur, qui sont ensuite traitées et utilisées comme fertilisants pour les sols. Une partie de ces boues retourne dans les bassins pour éviter une perte importante de bactéries.

Biofiltres et filtres bactériens

L'eau peut être percolée à travers un matériau pour assurer le développement des bactéries, comme des supports (lits bactériens), des argiles cuites, des sables ou des schistes. Cette méthode, plus avancée que les boues activées, permet d'éliminer une quantité et une diversité considérables de polluants. [10,11]

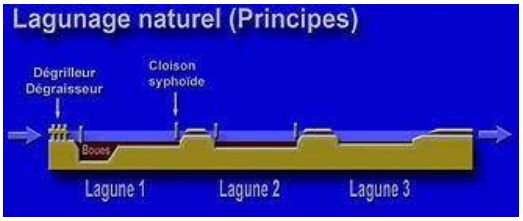


Figure X.3 : Le principe du lagunage naturel.

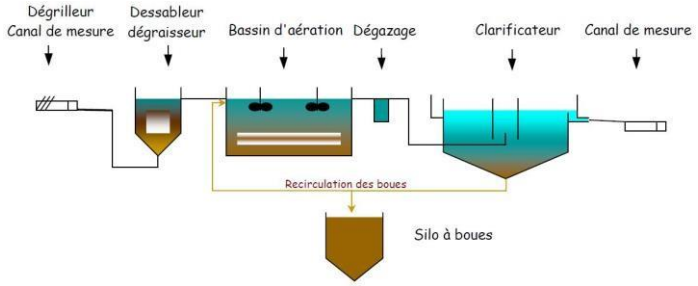


Figure IX.4 : Traitement des boues activées.

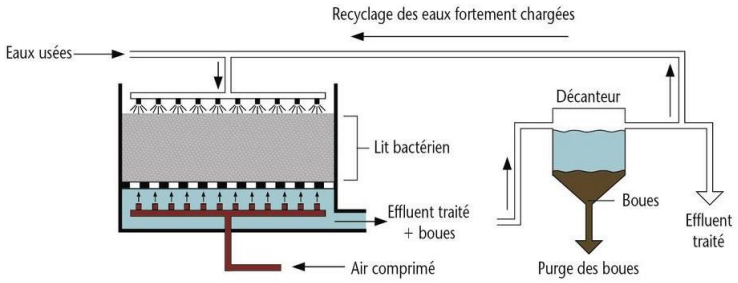


Figure XI.5 : Traitement biologique de l'eau brute.

E. Traitement complémentaire (Tertiaire)

Le traitement tertiaire des eaux usées combine les différentes méthodes physico-chimiques et biologiques avancées pour éliminer les éléments nutritifs résiduels et les polluants organiques, en s'appuyant sur des procédés tels que la déphosphatation biologique par déplacement nutritif (DNF), où l'eau traverse successivement différents réservoirs en présence de bactéries dans des conditions environnementales spécifiques avant d'être clarifiée pour récupérer les boues, ou encore le traitement par ultraviolets (UV) qui dégrade des molécules sensibles comme les œstrogènes, complétant ainsi les étapes de prétraitement et de traitement biologique primaire. [12].



Figure XII.6 : Traitement tertiaire des eaux usées

Chapitre II : Traitement des eaux usées par l’utilisation des algues

2.1 Introduction

Il est notoire que les grandes quantités de nutriments apportés au phytoplancton par les effluents secondaires des stations d'épuration des eaux contribuent grandement à l'eutrophisation de nos cours d'eau, provoquant le développement d'espèces gênantes qui perturbent l'écosystème, favorisé par la forte teneur en éléments inorganiques et la limpidité des effluents qui facilitent la pénétration de la lumière, principalement les ions ammonium, nitrate et ortho phosphate, et bien que les traitements tertiaires qui éliminent plus ou moins complètement ces ions ne soient pas couramment appliqués à cause du coût élevé de leur mise en œuvre, il est intéressant de développer une technologie permettant d'effectuer un traitement tertiaire des eaux usées en utilisant l'énergie solaire par le biais de micro-organismes photosynthétiques, ce qui aura de plus l'avantage de permettre la récupération des nutriments sous la forme d'une biomasse algale riche en protéines, dans cette optique que nous avons fait croître des algues phytoplanctoniques sur des eaux usées. [13]

2.2 Généralités sur les algues

2.2.1 Définition des algues

Les algues sont des organismes chlorophylliens se développant dans l'eau ou dans des milieux très humides [14], regroupant un ensemble d'organismes photosynthétiques aquatiques très divers, présentant des formes et des dimensions extrêmement variables [15].

2.2.2 Classification des algues

A. Les Pyrophytes ou dinoflagellés

Ce sont des organismes unicellulaires de couleur brune, dont la paroi est formée de plaques de cellulose sous la membrane plasmique. Ils font partie du phytoplancton et sont responsables du phénomène des eaux rouges, bien que certains dinoflagellés ne possèdent pas de pigments photosynthétiques.

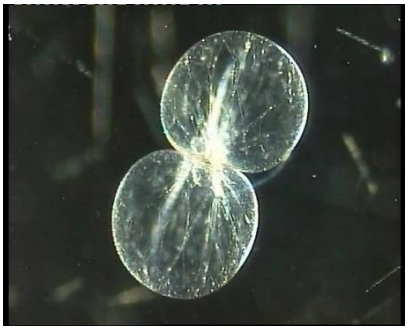


Figure II.1 : Phytoplancton-Les dinoflagellés

B. Les Chrysophytes ou Algues Dorées

Ce sont des algues de couleur jaune à brune, faisant partie du plancton d'eau douce, avec une paroi composée de pectine imprégnée de silice.



Figure II.2 : Chrysophytes (Algues Dorées)

C. Les Bacillariophycées ou Diatomées

Ces algues sont de couleur jaune, brune ou verte, avec une paroi principalement constituée de silice formant un squelette externe.



Figure II.3 : Biofilm de diatomées

D. Les Euglénophytes

Ce sont des algues flagellées vivant dans les eaux stagnantes, avec une paroi de plaques protéiques sous leur membrane plasmique. Certaines de ces algues ont perdu leur chlorophylle et peuvent alors être confondues avec des animaux.



Figure II.4 : Les Euglénophytes

E. Les Rhodophycées

Ou Algues Rouges (Porphyra, Nemalion) vivent principalement en eaux salées chaudes, jusqu'à 200 m de profondeur, avec une paroi comprenant de la cellulose et d'autres polysaccharides. De nombreuses espèces sont pluricellulaires.



Figure II.5 : Les Rhodophycées (Algues Rouges)

F. Les Phéophycées

Ou bien les Algues Brunes (Fucus, Laminaire), se développent en eaux salées plutôt froides, jusqu'à 20 m de profondeur, avec une paroi composée de cellulose mélangée à d'autres polysaccharides. Elles aussi comptent de nombreuses espèces pluricellulaires [16].



Figure II.6 : Les Phéophycées (Algues Brunes)

2.2.3 L’utilisation des algues

Tableau II.1 : Les différentes utilisations des algues

Domaine	Utilisation
Traitement des eaux usées	Les algues brunes de type laminaires sont séchées à l'air libre puis empaquetées dans des bombonnes qui servent au recyclage des eaux usées. [16]
Agroalimentaire	Utilisation principale des phycocoïlloïdes comme les alginates (E 400 à 405), les carraghénanes (E 407) et l'agar (E 406) en tant que gélifiant, émulsionnant, stabilisant et épaississant. [16]
Industrie textile	Les alginates sont employés depuis les années 60 dans l'impression des tissus (de sodium et calcium). [16]
Agriculture	Les algues issues de la laisse de mer sont utilisées directement en épandage dans les champs pour apporter leur richesse en sels minéraux. Les algues calcaires de type maerl servent à amender les sols acides en remplacement de la chaux. [16]
Cosmétique et thalassothérapie	L'algothérapie utilise les propriétés vivifiantes, hydratantes, anti-stress et restructurâtes des algues marines sous forme de bains ou d'enveloppements. Les extraits d'algues présentent aussi des propriétés anti-UV et antioxydantes utilisées dans les crèmes solaires et anti-âge, ainsi que dans les savons et shampooings comme agent texturant. [16]
Médecine	De nombreuses spécialités pharmaceutiques intègrent des colloïdes algaux comme excipients (sirops, enrobage de pilules et dragées). [16]

2.2.4 Caractéristiques des algues vertes

- Appartiennent à l'embranchement des Chlorophycées.
- Présentes dans les eaux douces et marines, peuvent former des colonies ou des filaments.
- Paroi cellulaire composée de cellulose.
- Chloroplastes entourés de deux membranes, contenant chlorophylle, caroténoïdes et xanthophylles.
- Groupe très diversifié, des formes unicellulaires microscopiques aux macro algues pluricellulaires. [16]
- Certaines espèces adaptées à la vie aérienne et à la dessiccation. [17]
- Une source importante de composés bioactifs comme des pigments, des polysaccharides, des protéines et des lipides.
- Utilisées en phytothérapie, cosmétologie et nutrition. [17]

2.3 Traitement des eaux usées par les algues

Le concept de traitement des eaux par les microalgues est relativement simple à comprendre. Les algues utilisent les nutriments présents dans le milieu aquatique, tandis que les eaux à traiter contiennent souvent une quantité de nutriments pouvant être absorbés par les algues [18], notamment des macronutriments comme le carbone, l'azote, le phosphore, le soufre, le potassium et la silice, ainsi que des oligo-éléments tels que le cobalt, le molybdène et le manganèse, et diverses vitamines [19]. Les algues utilisent la lumière comme source d'énergie et le CO2 comme source de carbone, et absorbent ces nutriments pour leurs fonctions cellulaires [20]. Ce processus de bioaccumulation se déroule en deux étapes : une adsorption physique ou un échange d'ions à la surface cellulaire, très rapide et réversible [21], suivie d'une absorption plus lente liée à l'activité métabolique [21, 22]. Les parois cellulaires des microalgues ont une grande capacité à lier les minéraux [21,23], grâce à des liaisons ioniques générées par une charge de surface négative et des liaisons covalentes avec les groupements fonctionnels des protéines et polysaccharides membranaires [24]. Ce mécanisme permet également l'absorption intracellulaire des métaux lourds, de la même manière que pour les ions essentiels du point de vue métabolique. [21]

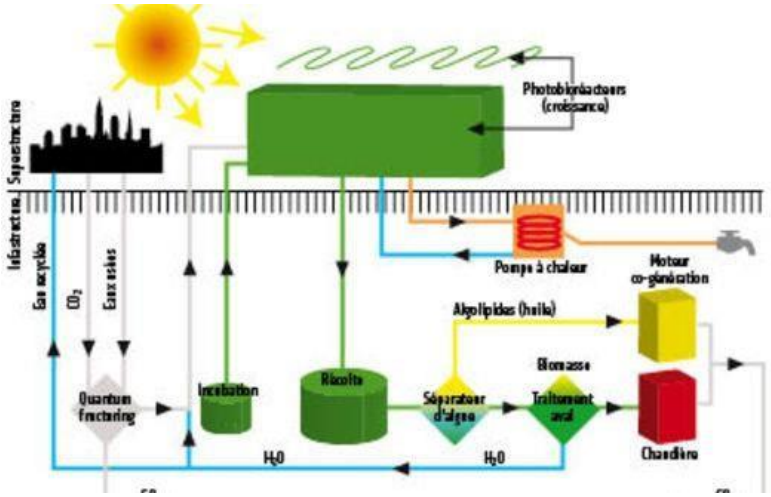


Figure II.7 : Recyclage des eaux usées par un mur d'algues

2.4 Réduction de la DBO/DCO

Les algues constituent un moyen efficace de fournir aux bactéries aérobies l'oxygène nécessaire à l'élimination de la DBO (Demande Biochimique en Oxygène) par oxydation de la matière organique, grâce à leur activité photosynthétique [24,25]. Ce processus permet de réduire considérablement les coûts élevés d'aération mécanique constatés dans les traitements traditionnels des eaux usées, puisque l'élimination d'un kg de DBO par oxygénation photosynthétique et ne nécessite aucun apport d'énergie, contrairement au processus de boues activées qui requiert environ 1 kWh d'électricité pour l'aération afin d'éliminer la même quantité de DBO. [26]

2.5 Enlèvement de nutriments N et P

De nombreuses études ont démontré le succès de l'utilisation de cultures d'algues pour éliminer les nutriments riches éléments d'azote et de phosphore, des eaux usées riches en ces composés [27]. Le taux de croissance des algues n'est pas affecté par la source d'azote inorganique (ammonium, nitrates, nitrites), bien que ces derniers doivent être réduits en ammonium avant d'être assimilés [19] , et la consommation de nitrates ne se produit qu'une fois que l'ammonium est presque complètement consommé [24]. Les phosphates inorganiques jouent également un rôle important dans la croissance cellulaire et le métabolisme des algues, qui préfèrent les formes H_2PO_4 et HPO_4^{2-}[19,28]. Afin d'assurer une utilisation simultanée de l'azote et du phosphore, le rapport N/P doit être maintenu dans un intervalle approprié. [29]

2.6 Enlèvement des métaux lourds

Il a été largement rapporté que les systèmes de traitement des eaux usées par les microalgues permettent d'éliminer efficacement divers ions métalliques tels que le chrome, le plomb, le zinc, le sélénium, le cadmium et le nickel. L'adsorption est considérée comme le principal mécanisme contribuant à cette élimination, et peut être réalisée à la fois par des cellules d'algues vivantes et mortes [30,31], grâce aux groupes fonctionnels présents à leur surface qui sont capables de se lier aux ions métalliques, rendant les microalgues excellentes pour capter les métaux lourds. La quantité de minéral adsorbé est directement liée au nombre de sites de liaison disponibles. Bien que la biosorption d'un métal puisse être influencée par la présence d'autres métaux [18], certains peuvent subir une réduction significative de leur assimilation en présence d'un autre métal, sans que la capacité d'assimilation du second élément ne soit pour autant affecté de manière significative. [32]

Conclusion générale

Les micro-algues sont des organismes aquatiques unicellulaires possédants des chloroplastes dont la taille varie du micron à la centaine de microns, se trouvant en abondance dans les milieux aquatiques. Les eaux usées de différentes compositions et de diverses origines constituent un problème pour la nature lors du rejet sans subir de traitements au préalable.

Le traitement des eaux par les microalgues offre une option efficace pour recycler les nutriments tout en améliorant la qualité de l'eau, de manière entièrement neutre en carbone. En effet, les algues fournissent par photosynthèse l'oxygène nécessaire aux bactéries aérobies pour l'oxydation de la matière organique, évitant ainsi les coûts élevés d'aération mécanique des procédés conventionnels. De plus, ce type de traitement semble plus performant que les procédés chimiques, qui peuvent conduire à une pollution secondaire. Il est désormais admis que les systèmes de traitement des eaux par les algues sont aussi efficaces que les systèmes de traitement conventionnels.

Références bibliographiques :

[1] *PANALIAPPAN, M. C., PH, H. G., & WOLFF, G. (2030). Développement futur de l'infrastructure de l'eau et des services conexes: évolutions et enjeux. 0CDE. Les infrastructures à l'horizon, 2.*

[2] *Amano, Y. (2011). De l'importance de l'eau. IAEA Bulletin, 53, 1.*

[3] *Chaoui, W., Bousnoubra, H., Benhamza, M., & Bouchami, T. (2013). Etude de la pollution des eaux des oueds Seybouse et Mellah (Région de l'Est Algérien). Synthèse: Revue des Sciences et de la Technologie, 26, 50-56.*

[4] *Ben Chehem, M., Bouazza, H., & Labbaz, L. (2014). Inventaire des études scientifiques relatives à la réutilisation des eaux usées dans le domaine piscicole (Doctoral dissertation).*

[5] *Ovie, S. I., & Adeniji, H. A. (1990). A simple guide to water quality management in fish ponds.*

[6] *HABIB, R., & EL RHAZI, O. (2007). Impact sanitaire de la réutilisation des eaux usées. Project de Fin d'études de Licence-SV, Université Cadi Ayyad–Marrakech (Maroc).*

[7] *PERSELLO, L. Recensement des ouvrages de prélèvement d'eau souterraine, autres que ceux destinés à l'alimentation en eau potable, sur le territoire du SAGE Orne amont-Etat des lieux. : https://www.gesteau.fr/sites/default/files/gestion-des-eaux-pluviales.pdf*

[8] *Ballay, D., & Blais, J. F. (1998). Le traitement des eaux usées. Revue des sciences de l'eau, 11, 77-86.*

[9] *BOUZIANE, E., & HADJ DJILANI, A. Traitement des eaux par une algue verte CHLORELLA pyrenoïdosa (Doctoral dissertation).*

[10] *Condom, N., Molle, B., Tomas, S., Olivier, Y., Audouard, M., & Granier, J. (2013). La réutilisation maîtrisée des eaux usées : approfondir les connaissances pour lever les freins et relever les défis. Sciences Eaux & Territoires pour tous, (2), 54-57.*

[11] *El Haité, H. (2010). Traitement des eaux usées par les réservoirs opérationnels et réutilisation pour l'irrigation (Doctoral dissertation, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne).*

[12] *Aussel, H., Le Bâcle, C., & Dornier, G. (2004). Le traitement des eaux usées. Travail & sécurité (Paris), (645), 1-4.*

[13] *Picard, G. A., De La Noüe, J., Piette, J. P., & Kirouac, C. (1979). Utilisation de l'algue oocystis sp. pour le traitement tertiaire des eaux usées—I. Culture en vrac de cellules préalablement conditionnées en cyclostat. Water Research, 13(12), 1203-1212.*

[14] *Iltis, A. (1980). Les algues. Flore et Faune aquatiques de l'Afrique sahelo-soudanienne, 1, 9-61.*

[15] *Ainane, T. (2011). Valorisation de la biomasse algale du Maroc: Potentialités pharmacologiques et Applications environnementales, cas des algues brunes Cystoseira tamariscifolia et Bifurcaria bifurcata (Doctoral dissertation, Faculté des Sciences Ben M'sik Université Hassan II Casablanca).*

[16] *Barsanti, L., & Gualtieri, P. (2022). Algae: anatomy, biochemistry, and biotechnology. CRC press.*

[17] *Daude, L. (2021). L'utilisation des algues en pharmacie et parapharmacie (Doctoral dissertation).*

[18] *Krishna A.R., Dev L. and Thankamani V. (2012). An integrated process for Industrial effluent treatment and Biodiesel production using Microalgae : Review Article. Research in Biotechnology., 3(1), 47-60*

[19] *Cai T., Park S.Y. and Li Y. (2013). Nutrient recovery from wastewater streams by microalgae: Status and prospects. Renew. Sustain Energy. Rev., 19, 360–369*

[20] *Pedroni P., Davison J., Beckert H., Bergman P. and Benemann J. (2001). A proposal to establish an international network on biofixation of CO2 and greenhouse gas abatement with microalgae. Journal of energy and environmental research., 1(1), 136-150*

[21] *Veglio F. and Beolchini F. (1996). Removal of metals by biosorption : a review. Hydrométallurgie., 44, 301-316*

[22] *Nourbakhsh M., Sag Y., Ozer D., Aksu Z., Kutsal T. and Caglar A. (1994). A Comparative Study of Various Biosorbents for Removal of Chromium(V1) Ions from Industrial Waste Waters. Process Biochemistry., 29, l-5*

[23] *Tsezos M. and Volesky B., (1981). Biosorption of uranium and thorium. Biotechnol. Bioeng., 23, 83-604*

[24] *Gao F., Li C., Yang Z.H., Zeng G.M., Mu J., Liu M. and Cui W. (2016). Removal of nutrients, organic matter, and metal from domestic secondary effluent through microalgae cultivation in a membrane photobioreactor. J Chem. Technol. Biotechnol., 91, 2713 – 2719.*

[25] *Lavoie A. and de la Noue J. (1985). Hyperconcentrated cultures of Scenedesmus obliquus. A new approach for wastewater biological tertiary treatment. Water. Res., 19,1437-1442*

[26] *Oswald W.J . (2003). My sixty years in applied algology. Journal of Applied Phycology., 15, 99– 106*

[27] *Hoffmann J.P. (1998). Wastewater treatment with suspended and nonsuspended algae. J. Phycol., 34, 757–763*

[28] *Martinez M.E., Jimenez J.M. and El Yousfi F. (1999). Influence of phosphorus concentration and temperature on growth and phosphorus uptake by the microalga Scenedesmus obliquus. Bioresource Technology., 67, 233-240*

[29] *Li X., Hu H.Y., Gan K. and Sun Y.X. (2010). Effects of different nitrogen and phosphorus concentrations on the growth, nutrient uptake, and lipid accumulation of a freshwater microalga Scenedesmus sp. Bioresource Technology., 101, 5494–500.*

[30] *De la Noie J., Laliberté. and Proulx D. (1992). Algae and waste water. Journal of Applied Phycology., 4, 247-254.*

[31] *Fourest E. and Volesky B. (1996). Contribution of sulfonate groups and alginate to heavy metal biosorption by the dry biomass of Sargassum fluitans. Environ. Sci. Technol., 30, 277–282.*

[32] *Açikel U. and Alp T. (2009). A study on the inhibition kinetics of bioaccumulation of Cu(II) and Ni(II) ions using Rhizopus delemar. Journal of Hazardous Material., 168, 1449-1458.*