



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
L'Université Echahid Hamma Lakhdar - El Oued
Faculté Des Sciences De La Nature Et De La Vie
Département De Biologie Cellulaire et Moléculaire



Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de Master Académique

Filière : Sciences biologiques

Spécialité: Toxicologie

Thème :

Contribution à la bioremédiation des polluants organiques par *Arthrospira platensis* dans le STEP 02(Hassani Abdlkrim)

Présenté par :

- ✓ BOUREZMA Souad
- ✓ GAID Inas
- ✓ REDOUANI Nour el houda

Devant le Jury:

GHANIA Ahmed	MAA	Président	Université d'El-Oued
KHELEF Yahia	MCB	Examineur	Université d'El-Oued
ABDERREZAK Kiram	MAA	Rapporteur	Université d'El-Oued

Année Universitaire: 2020 / 2021



Dédicace

☞ *Mon Dieu, les moments ne peuvent être beaux que par ton mentionner et tes remerciements, et l'au-delà ne peut être qu'avec ton pardon, et le paradis n'est pas merveilleux sauf pour te voir.*

☞ *A celui qui a atteint le message et dirigé le secrétariat et conseillé la nation, au prophète de la miséricorde Muhammad que Dieu le bénisse et lui accorde la paix.*

☞ *Je dédie ce travail:*

☞ *A qui Dieu a donné le prestige et le dignité, à qui porte fièrement son nom, vos paroles resteront les étoiles guidées aujourd'hui, demain et pour toujours, au grand cœur, mon cher père ALI.*

☞ *A mon ange dans la vie, au sens de l'amour et de la tendresse, au sourire de la vie et au secret de l'existence, à qui sa prière était le secret de mon succès, à ma bien-aimée mère GAZALA.*

☞ *A mon soutien, ma force et mon refuge après Dieu, aux cœurs purs, mes frères DJAMAL, BELGACEME, KHALED. Et mes sœurs NADJET, MABROKA, REBEHA*

☞ *Aux sœurs qui n'ont pas donné naissance à ma mère, à ceux qui se sont distingués par la fraternité, fidélité et le donnant, et ils m'ont accompagné dans les chemins de vie doux et tristes de ceux que j'aimais mes chers amis WAHAYBA, WIJDAN, MALIKA, SAIDA Et à tous mes camarades de classe sans exception, je t'aime en Dieu.*



SOUAD



Dédicace

- ☞ *Je remercie Dieu, le directeur de la lumière après les ténèbres. Je le loue.*
- ☞ *À celui qui a transmis le message, conduit la confiance et conseillé la nation au Prophète de la Miséricorde, Muhammad, que les prières et la paix de Dieu soient sur lui.*
- ☞ *des mots de remerciements de gratitude à ceux qui ont été pour nous comme des bougies dans les nuits noires ‘*
- ☞ *Je dédie ce travail à celui qui récolte les épines du nom chemin de la connaissance à mon cher père pour celui qui m'a nourri d'amour de tendresse et de baume guérisseur.*
- ☞ *Pour celle qui a fait le ciel sous ses pieds, pour celle qui a brûlé pour éclairer mon chemin comme un bouclier protecteur et le trésor qui reste, ma chère mère, que Dieu prolonge sa vie...*
- ☞ *A ceux qui rendent mon cœur heureux et ma vie.....*
- ☞ *A ceux qui partagent mes joies et mes peines ceux avec qui j'ai grandi et ils ont été le meilleur bien. Pour moi avec mes frères et sœurs, chacun en son nom....*
- ☞ *A ceux avec qui la chaire du savoir et de l'amitié a réuni mes collègues, chacun en son nom, je leur donne les plus hautes expressions d'amour.*
- ☞ *A tous mes professeurs qui m'ont accompagné tout au long de mon parcours académique.*



Dédicace

- ⌘ Je remercie Dieu Tout-Puissant et Miséricordieux qui m'a donné
- ⌘ Volonté, patience et courage pour faire le travail sur le long terme.
- ⌘ A celui qui a atteint le message et dirigé le secrétariat et conseillé la nation, au
- ⌘ prophète de la miséricorde Muhammad que Dieu le bénisse et lui accorde la paix.
- ⌘ Je dédie ce modeste travail à : :
- ⌘ A mes chers père et mère " que Dieu leur fasse miséricorde ".
- ⌘ Un devoir de gratitude m'invite à exprimer mes grands remerciements à
- ⌘ **Dr KIRAM Abderrazak**, qui a été crédité après Dieu Tout-Puissant pour la supervision de cette étude.
- ⌘ A mes frère : **El Habib, Abdel Hamid, Saleh, Abdel Malek, Saad.**
- ⌘ A mes sœurs : **Louisa, Hadjara, Iman, Salima.**
- ⌘ A mes très chère amis : **Inas, Souad, Fatima, Assila, Inas, Haniya, Rima, Fatima Al-Zahra, Acila, Takia**
- ⌘ A toute la promotion de la 2eme Master en toxicologie.



NOUR

Remerciements

Merci à Dieu Tout-Puissant, qui nous a aidé à terminer de notre mémoire, et que la paix et les bénédictions soient sur l'envoyé comme une miséricorde pour les mondes, Muhammad que Dieu le bénisse et lui accorde la paix.

*Le devoir de gratitude nous invite à exprimer nos grands remerciements au notre promoteur **Dr KIRAM Abderrazak**, qui a été crédité après Dieu Tout-Puissant pour avoir supervisé cette étude, Il était la meilleur guide et mentor, Avec les plus sincères prières à la santé permanente et la conciliation au service de la science et de son peuple.*

Nous remercions tous ceux qui nous ont aidés à termine de ce mémoire, nous tendons la main et nous fournissent les informations nécessaires.

Nous n'oublions pas de transmettre les plus belles expressions de remerciements, gratitude, d'appréciation et d'amour à ceux qui ont transmis le message le plus saint de la vie à ceux qui ont ouvert la voie pour la science et la savoir, à tous nos meilleurs enseignants de la faculté des Sciences de la nature et de la vie.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis et toute la promotion 2021, qui nous ont toujours encouragées au cours de la réalisation de ce mémoire.

Résumé

L'objectif de la présente étude est d'évaluer ou d'étudier le taux d'élimination des polluants organiques d'eaux usées par le *Arthrospira platensis*, apprendre les différentes techniques d'analyse Ph, conductivité, biomasse et polluant organique (nitrate, nitrite, ammoniac).

Les résultats obtenus du suivi de croissance d'*Arthrospira platensis*, la stabilité de température (32 °C), augmentation du pH de milieu et une augmentation de biomasse de, une diminution de la CE et absence d'ammoniac et nitrite dans le milieu, une diminution de valeur de nitrate et de nitrogène totale. Les résultats obtenus du suivi de la bioremédiation du polluant organique par *Arthrospira platensis*, la stabilité de la température (32 °C), augmentation du pH de l'eau d'entre filtre et une augmentation puis une diminution de biomasse, une diminution de la CE. une élimination de polluant organique (ammoniac, nitrite, nitrate) par l'*Arthrospira platensis*. une diminution de la nitrogène totale.

Mots clés: microalgues, *Arthrospira platensis*, spiruline, bioremédiation, eaux usées, STEP Hassani Abdelkrim

Abstract

The objective of this study is to evaluate or study the rate of elimination of organic pollutants from wastewater by *Arthrospira platensis*, to learn the different analysis techniques for Ph, conductivity, biomass and organic pollutant (nitrate, nitrite, ammonia).

The results obtained from monitoring the growth of *Arthrospira platensis*. temperature stability. (32 °C). increase in medium pH and increase in biomass, decrease in EC and absence of ammonia and nitrite in the medium, decrease in nitrate and total nitrogen values results obtained from monitoring the bioremediation of the organic pollutant by *Arthrospira platensis*. temperature stability (32 °C). increase in the pH of the filter water and an increase and then a decrease in biomass. a decrease in the EC. an elimination of organic pollutant. (Ammonia. nitrite, nitrate) by *Arthrospira platensis* a decrease in total nitrogen.

The results obtained show that the most important is spirulina has a significant rate in the elimination of ammonia.

Key words: microalgae, *Arthrospira platensis*, spirulina, bioremediation, wastewater, WWTP Hassani Abdelkrim

الملخص

الهدف من هذه الدراسة هو تقييم أو دراسة معدل التخلص من الملوثات العضوية من مياه الصرف الصحي بواسطة *Arthrospira platensis*. والتعرف على مختلف التقنيات لزراعة طحالب *السبيرولينا* وتقنيات معالجة مياه الصرف الصحي المختلفة في محطة المياه الملوثة حساني عبد الكريم، تعلم تقنيات التحليل المختلفة درجة الحموضة والتوصيلية والكتلة الحيوية والملوثات العضوية (النترات والنترت والأمونيا).

النتائج التي تم الحصول عليها من مراقبة *Arthrospira platensis* . استقرار في درجة الحرارة (32 درجة مئوية)، وزيادة في درجة حموضة الوسط وزيادة في الكتلة الحيوية، وانخفاض في التوصيل وغياب الامونيا والنترت، انخفاض في قيمة النترات ونيروجين الكلي اما بالنسبة الى النتائج التي تم الحصول عليها من مراقبة المعالجة الحيوية للملوثات العضوية بواسطة *Arthrospira platensis*. ثبات درجة الحرارة (32. درجة مئوية) زيادة في الرقم الهيدروجيني. زيادة ومن ثم انخفاض في الكتلة الحيوية. انخفاض في التوصيل، نزع الملوثات العضوية (الامونيا، النترت والنترات) بواسطة *Arthrospira platensis*, انخفاض في نيروجين الكلي.

النتائج التي تم الحصول عليها تظهر أن أهم هو سبيرولينا لديها معدل كبير في القضاء على الأمونيا.

الكلمات المفتاحية: الطحالب الدقيقة، *Arthrospira platensis*، *سبيرولينا*، المعالجة الحيوية، مياه الصرف الصحي، محطة معالجة. مياه الصرف الصحي حساني عبد الكريم.

Dédicace

Remerciements

Résumé

Liste Des Figures

Liste Des Tableaux

Liste d'abréviation

Introduction générale 1

Partie Théorique

Chapitre I : Généralités et présentation des les microalgues et la Spiruline

1- Définition des microalgues	5
2- Diversité et classification	5
3- Applications des microalgues	5
4- Définition des spirulines	7
5- Morphologie	7
6- Habitat et répartition géographique	8
7- Classification taxonomique	9
8- Cycle biologique de reproduction	10
9- Composition	10
9-1- protéines	10
9-2- glucides	11
9-3- lipides	11
9-4- Acides nucléiques	11
9-5- Vitamines	11
9-6- minéraux	12
9-7- enzymes	13
9-8- pigments	13
10- Culture et production de la spiruline	14
10-1- Milieu de culture	14
10-2- Paramètres de culture	15
10-3- Les différents modes de production de Spiruline	16
11- Activités biologiques de la spiruline	19
11-1- Activité antibactérienne	19
11-2- Activité anti-oxydante	20

11-3- Activité antimicrobienne	20
11-4- Activité anticoagulante	20
11-5- Hépatite C	20
11-6- Activité anticancéreuse	21
12- Principales applications de la spiruline	21
12-1- En alimentation humaine	21
12-2 En alimentation animale	21
12-3- En cosmétique	21
12-4- En thérapeutique	22

Chapitre II : Généralités sur les eaux usées

1- Définition d'une eau usée	24
2- Composition des eaux usées	24
3- Caractéristiques des eaux usées	24
3-1- Caractéristiques physiques	24
3-2- Caractéristiques chimiques	25
3-3- Caractéristiques biologiques	25
4- Origine des eaux usées	26
4-1- aux usées domestiques	26
4-2- eaux usées industrielles	26
4-3- eaux pluviales	27
4-4- eaux usées agricoles	27
5- Effets des eaux usées	27
6- Pollution de l'eau	28
6-1- Pollution physique	28
6-2- Pollution chimique	28
6-3- Pollution biologique	29
7- Traitement des eaux usées	29
7-1-prétraitement	29
7-2- Traitement primaire (physico-chimique)	30
7-3- Traitement secondaire (traitement biologique)	30
7-4- Traitement tertiaire	34
7-5- Traitement des boues	35

Chapitre III : Bioremédiation par des microalgue

1- Définition des bioremédiation	37
2- Bioremédiation par les microorganismes	37
3- Phycoremédiation	38
4- Principe de la bioremédiation	39
4-1- Bioaugmentation	39
4-2- Biofiltration	39
4-3- Biostimulation	40
4-4- Biolixiviation	40
5- Importance des micro-algues dans le traitement des eaux usées	41
6- Avantages et inconvénients de la bioremédiation	41

Partie Pratique

Chapitre IV : Présentation de la zone D'étude

1- Station d'épuration des eaux usées urbaines (STEP2)	47
2- Description générale de la station	47
3- Objectif de traitement de la station	48
4- Principe de traitement	48

Chapitre V : Matériel et méthodes

1- Matériel d'étude	55
1-1- Matériel biologique	55
1-2- Matériel non biologique	55
2- méthodes	56
2-1- Suivi de croissance d' <i>Arthrospira platensis</i>	56
2-2- Bioremédiation par de <i>Arthrospira platensis</i>	60

Chapitre IV : Résultats et discussion

1- Suivi de croissance d' <i>Arthrospira platensis</i> dans le Milieu Zarrouk	66
1-1- Evolution des paramètres physico-chimiques	66
2 - Suive de la bioremédiation du polluant organique par <i>Arthrospira platensis</i>	70
2-1- Température	71
2-2- pH	71
2-3- Biomasse	72
2-4- Conductivité	73
2-5- NH3 et NO2 et NO3	73
2-6- NT	74

<i>Conclusion générale</i>	76
<i>Références Bibliographiques</i>	79-85

Liste Des Figures

Partie Théorique

Chapitre I : Généralités et présentation des les microalgues et la Spiruline

Figure I.1: Diversité du champ d'application des microalgues	6
Figure I.2 : Représentation schématique du procédé de fixation de CO ₂ par les microalgues à partir de gaz d'échappement industriel	6
Figure I.3: Schéma du principe de production du biodiesel à partir des microalgues	7
Figure I.4: Différents aspects de la spiruline	8
Figure I.5: Répartition géographique de la spiruline	9
Figure I.6: Cycle biologique de reproduction de la spiruline	10
Figure I.7: Composition chimique de la spiruline	10
Figure I.8: Diverses cultures artisanales de spiruline	17
Figure I.9: Bassin contenant de la spiruline	17
Figure I.10: Des bassins améliorés à Hawaï	18
Figure I.11: Exemples de bassins	19
Figure I.12: Photo d'une unité de production microalgues par photobioréacteurs	19

Chapitre II : Généralités sur les eaux usées

Figure II.1: Consommation d'eau et production d'eaux usées par les principaux secteurs	27
--	----

Chapitre III : Bioremédiation par des microalgue

Figure III.1: Représentation schématique de simulations de traitement des eaux usées avec culture de biomasse de microalgues	38
--	----

Partie Pratique

Chapitre IV : Présentation de la zone D'étude

Figure IV.1: Localisation de la commune dans la wilaya d'El Oued	46
Figure IV.2: Localisation de la station d'épuration	47
Figure IV.3: Stations de lagunage aéré de Hassani Abdelkrim	47
Figure IV.4: Un résumé le travail de la station STEP2 de HASSANI AbdelKrim	49
Figure IV.5: Dégrillage (station de Hassani Abdelkrim)	50
Figure IV.6: Dessablage (station de Hassani Abdelkrim)	50
Figure IV.7: Lagune aéré (station de Hassani Abdelkrim)	51
Figure IV.8: Aérateur (station de Hassani Abdelkrim)	52
Figure IV.9: Lagune de finition (station de Hassani Abdelkrim)	52

Figure IV.10: Lits de séchage (station de Hassani Abdelkrim)	53
--	----

Chapitre V : Matériel et méthodes

Figure V.1: La souche de spiruline <i>Arthrospira platensis</i>	55
Figure V.2: étape de préparation des milieux de culture	58
Figure V.3: spectrophotometer	59
Figure V.4: Conductimètre (Sens ion5)	61
Figure V.5: PH mètre (Sens ion 1)	61
Figure V.6: Oxymètres (LDO HQ 30d)	62
Figure V.7: Etapes de mesure l'azote totale	52
Figure V.8: système de tests en cuve LCK 342	64
Figure V.9: système de tests en cuve LCK 339	64

Chapitre IV : Résultats et discussion

Figure IV.1: Evolution de la Température dans le milieu de culture	66
Figure IV.2: Evolution du pH dans le milieu de culture de la spiruline	67
Figure IV.3: Evolution de la biomasse dans le milieu de culture de la spiruline	68
Figure IV.4: Evolution de la Conductivité électrique (CE) dans le milieu de culture de la spiruline	68
Figure IV.5: Evolution du nitrate dans le milieu de culture de la spiruline	69
Figure IV.6: Evolution du nitrogène totale dans le milieu de culture de la spiruline	69
Figure IV.7: Evolution de la Température dans l'eau d'entre filtre	71
Figure IV.8: Evolution du pH dans l'eau d'entre filtre	71
Figure IV.9: Evolution de la biomasse dans l'eau d'entre filtre	72
Figure IV.10: Evolution du Conductivité électrique dans l'eau d'entre filtre	73
Figure IV.11: Evolution de l'Ammoniac (NH ₃) dans l'eau d'entre filtre	73
Figure IV.12: Evolution de Nitrite (NO ₂) et Nitrate (NO ₃) dans l'eau d'entre filtre	74
Figure IV.13: Evolution de Nitrogène totale (NT) dans l'eau d'entre filtre	75

Liste Des Tableaux

Partie Théorique

Chapitre I : Généralités et présentation des les microalgues et la Spiruline

Tableau I.1 : Composition en pourcentage en éléments glucidiques de la spiruline	11
Tableau I.2 : Teneur en vitamines en µg/g de matière sèche de spiruline	12
Tableau I.3 : Composition en minéraux de la spiruline et doses requises	12
Tableau I.4 : Teneurs en pigments exprimées en mg pour 10g de matière sèche de <i>Arthrospira platensis</i>	14
Tableau I.5 : Analyse d'un milieu de culture typique	14

Chapitre II : Généralités sur les eaux usées

Tableau II.1: Caractéristiques des eaux usées et leurs sources	25
Tableau II.2: Avantages et inconvénients des méthodes de traitement biologique	32

Chapitre III: Bioremédiation par des microalgue

Tableau III.1: Les avantages et inconvénients de la biorestauration, de l'excavation et des traitements chimiques	42
---	----

Partie Pratique

Chapitre IV: Présentation de la zone D'étude

Tableau IV.1: Données générales de la station	48
---	----

Chapitre V : Matériel et méthodes

Tableau V.1: matériel non biologique	55
Tableau V.2: Composition chimique du milieu de culture (milieu de Zarrouk)	56

Chapitre IV : Résultats et discussion

Tableau IV.1: Suivi de croissance d' <i>Arthrospira platensis</i> dans le Milieu Zarrouk	66
Tableau IV.2: Suive de la bioremédiation du polluant organique par <i>Arthrospira platensis</i>	70
Tableau IV.3: Analyse d'aux d'entrée et de sortie de la STEP Hassani Abdelkrim	70

Liste d'abréviation

A1,A2,A3: lagunes aérée.

CO₂ : Dioxyde de carbone.

DCO: Demande chimique en oxygène.

DBO : Demande biochimique en oxygène.

EDTA: Ethylene Diamine Tetraacetatic Acide.

ERU: eaux résiduaires urbaines.

MES: matière en suspension.

MgSO₄.7H₂O: magnesium sulfate heptahydrate.

Na₂CO₃: sodium carbonate.

NaNO₃: sodium nitrate.

NH₃: ammoniac.

NO₂: nitrite.

NO₃: nitrate.

Nt: L'azote total .

ONA: Office National d'Assainissement.

pH: potentiel hydrogène.

POPS : Polluant organique persistant.

SOD : Super Oxyde Dismutase.

STEP 2 (STEP) Station de traitement des eaux pollué.

TDS: Solides totaux dissous.

TH: Titre hydrométrique.

T°: Température.

UV-Visible : Ultra-Violet-Visible.

μS: micro siemens.

CE : connectivité électrique.

Introduction générale

Introduction générale

La pollution de l'environnement est un problème majeur qui affecte le monde aujourd'hui. Il est pollution est due à toute substance physique, chimique ou biologique rejetée dans une eau naturelle qui perturbe l'équilibre de cette eau (**Derhoek, 2007**). Les approches peuvent contribuer à l'élimination de cette contamination comme la bioremédiation qui est une technologie simple utilisant les microorganismes pour la détoxification et dépollution de l'eau est principalement dans le cadre de l'épuration des eaux usées (**Romdhane Marwa, 2010**).

Ces processus biologiques sont stimulés par des microorganismes, des plantes et des enzymes (**Leyval, 2008**). Parmi les différentes techniques de bioremédiation on trouve la phycoremédiation, cette dernière on utilisée un type de processus on appelée la phycoremédiation c'est-à-dire dépollution par les microalgues.

Les microalgues sont des microorganismes unicellulaires photosynthétiques qui utilisent la lumière du soleil comme source d'énergie pour fixer le dioxyde de carbone et elles contiennent la chlorophylle. (**PERSON, 2010**).

Arthrospira Platensis est plus connue sous le nom de Spiruline (**Cruchot, 2008**). est une filamenteuse qui prolifère facilement dans les lacs alcalins et eaux saumâtres du monde entier.

Dans le monde, *Arthrospira platensis* est un objet approprié pour les recherches dans le domaine de la bioremédiation de deux points de vue principaux : (1) c'est un objet commode pour la réalisation d'expériences modèles en laboratoire et pour leur transfert dans des conditions industrielles en raison de ses particularités biotechnologiques ; (2) étant un micro-organisme extrêmophile, évite facilement la concurrence avec d'autres espèces en culture en plein air, offrant la possibilité d'avoir une biomasse relativement bon marché pour la recherche et la mise en œuvre de technologies de bioremédiation in situ et ex situ. (**Cepoi, L, 2020**).

En Algérie, malgré il contient 51 sites de zones humides dans la convention de RAMSAR mais il n'y a pas des études sur la bioremédiation par des microalgues.

Dans cette étude nous étudierons la capacité de bioremédiation par la souche *Arthrospira platensis*, alors; quelle la capacité de biorémediation de polluant organique par la souche *Arthrospira platensis* dans la STEP 02 de Hassani Abdllkrim.

L'objectif de cette étude est :

- évaluer le taux des élimination de polluant organique de eaux usée par le *Arthrospira platensis*.
- Apprendre différentes techniques de culture de micro-algues Spiruline.
- Apprendre différentes techniques de traitement de station de eau usée dans le STEP 02 Hassani Abdllkrim.

- Apprendre différentes techniques d'analyse physicochimique (PH,T, conductivité....)

Notre étude sera divisée en deux parties: une synthèse bibliographique et une partie pratique.

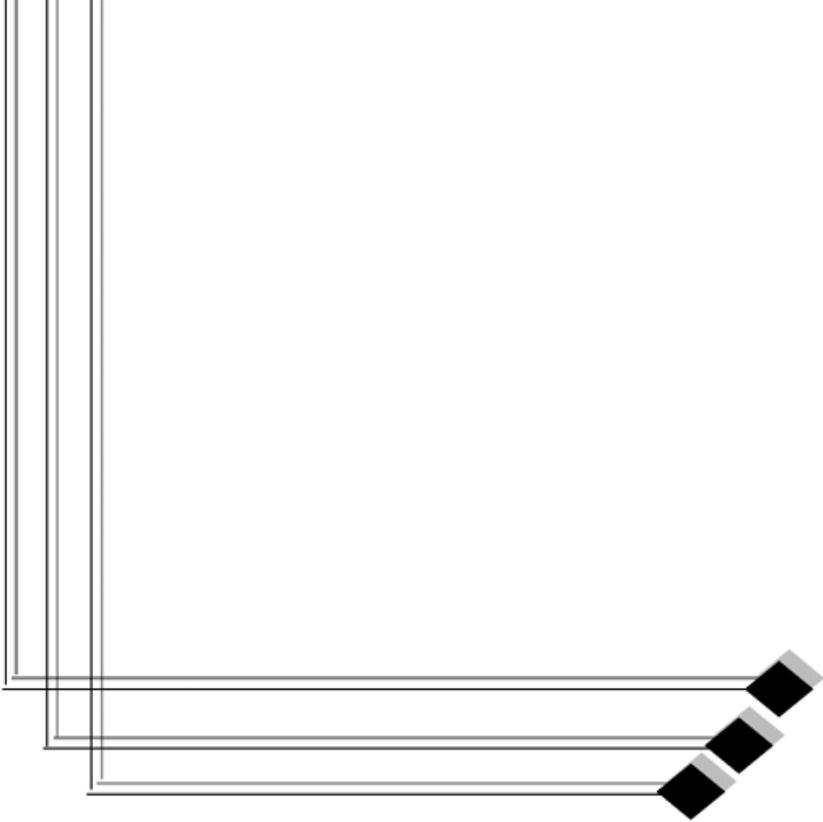
La synthèse bibliographique s'étend sur trois chapitres, le premier chapitre présente des généralités sur les micro algues et la spiruline et les divers domaines d'applications généralités sur les eaux usées, et leurs traitements dans le deuxième chapitre, le troisième est la bioremédiation par des microalgues et différentes techniques.

La deuxième partie, partie pratique, subdivisée en trois grands chapitres :

- Le premier chapitre est la présentation de la région d'étude
- Le chapitre deux décrit tout le matériel (biologique et non biologique) utilisé et présente en détail les méthodes entreprises pour l'aboutissement à l'objectif souligné
- Le troisième chapitre nous avons présentés les résultats obtenus et leurs discussions.
- Cette étude s'achève par une conclusion et les perspectives qui ont pu être dégagées.



Partie Théorique



Chapitre I

Généralités et présentation des les microalgues et la Spiruline

Les algues généralement et la *SPIRULINE* particulièrement sont considérées comme des meilleures sources alimentaires. Puisqu'elles sont riches en éléments essentiels pour la santé humaine comme les vitamines, protéines, lipides, acides gras et les éléments minéraux et d'oligoéléments (**Doumenge ;1993**).

La culture de la *SPIRULINE* est considérée comme un jalon majeur pour le développement économique, elle est utilisée au niveau mondial pour leur grande valeur de nutritive (**Lucchetti, 2014**).

Ce chapitre introduit tout d'abord des généralités sur les microalgues puis une présentation sur l'algue *SPIRULINE* (sa classification, sa morphologie, ses conditions de croissances et ses utilisations...etc).

1- Définition des microalgues

Les microalgues sont des organismes microscopiques eucaryotes photosynthétiques vivant dans les mers, les océans, les eaux douces et les eaux saumâtres (**SADI, 2012**). Ce sont définies comme des organismes unicellulaires ou pluricellulaires soit des Eucaryotes ou des Procaryotes (**SIALVE et STEYER, 2013**). Les microalgues caractérisées principalement par l'absence de racines et de feuilles mais possédant de la chlorophylle ainsi que d'autres pigments pour réaliser la photosynthèse (**BECERRA C., 2009**). Leur mécanisme photosynthétique est similaire à celui des plantes terrestres (**SADI, 2012**).

2- Diversité et classification

Les microalgues constituent un groupe extrêmement hétérogène rassemblé autour d'une cohérence physiologique : la photosynthèse oxygénique. Cette famille rassemblerait de plusieurs centaines de milliers à plusieurs millions d'espèces selon les estimations, parmi lesquelles 47000 espèces sont décrites. Par comparaison, la diversité des plantes supérieures est de l'ordre de 400 000 espèces. La classification (Tableau 1) de cette diversité est complexe et la taxonomie est sujette à de fréquents bouleversements du fait notamment de l'utilisation des techniques de phylogénie moléculaire. (**SIALVE et STEYER, 2013**).

3- Applications des microalgues

Au vu de leur biodiversité et leurs propriétés biochimiques, les microalgues se révèlent très prometteuses pour de nombreuses applications dans des domaines variés tels que l'industrie pharmaceutique, agro-alimentaire, l'environnement et les énergies renouvelables (Figure (I.1)) (**FILALI, 2012**).

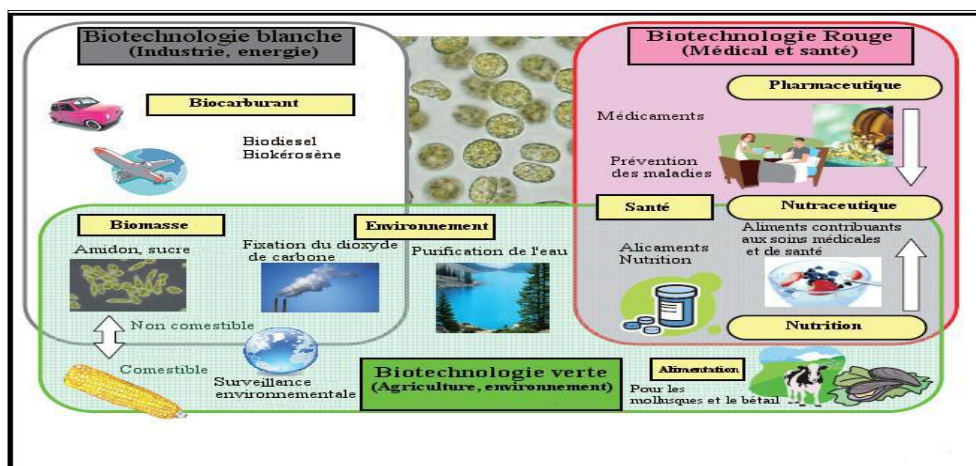


Figure (I.1) : Diversité du champ d'application des microalgues (FILALI, 2012).

- **Alimentation humaine et animale :** la Spiruline est par exemple encore récoltée et consommée par les habitants des bords du lac Tchad. Si certains pigments sont utilisés comme colorants alimentaires (β -carotène, phycobiliprotéines), mondiale, les microalgues sont utilisées directement pour subvenir aux besoins des stades larvaires des mollusques bivalves et des crustacés ou indirectement comme complément alimentaire et comme substrat pour le zooplancton (SIALVE et STEYER, 2013).
- **Pharmaceutique et cosmétique :** les caroténoïdes sont utilisés comme antioxydants (Astaxanthine) et comme colorants à usage alimentaire, pharmaceutique et cosmétique (β -carotène, phycobiliprotéines). (SIALVE et STEYER, 2013). D'autres composés aux propriétés antifongiques, antibactériennes, antivirales et antihistaminiques comptent également parmi les molécules à intérêt pharmaceutique.
- **Environnement :** Traitement des eaux usées, Systèmes de support de vie, Séquestration du CO_2 (figure I.2) (FILALI, 2012).

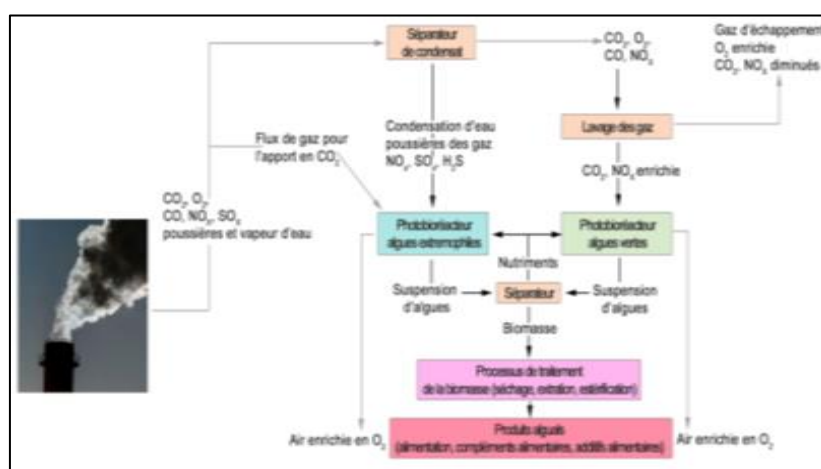


Figure (I.2): Représentation schématique du procédé de fixation de CO_2 par les microalgues à partir de gaz d'échappement industriel (FILALI, 2012).

- **La production d'énergie** : Production de bio-oïl, Production de biocarburant et dans la Production de biodiesel (figure I.3) (FILALI, 2012).

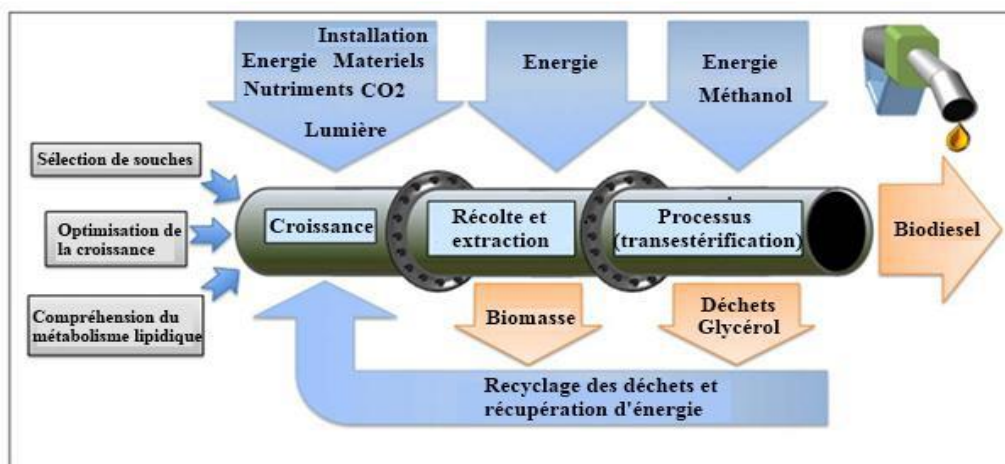


Figure (I.3) : Schéma du principe de production du biodiesel à partir des microalgues. (FILALI, 2012).

4- Définition des spirulines

Arthrospira platensis, commercialement connue sous le nom de spiruline, est une cyanobactérie microscopique et filamenteuse de couleur bleu-vert avec des trichomes en spirale (Sili *et al*, 2012). Elle constitue l'une des bactéries capables de faire la photosynthèse pour produire de l'oxygène (Sguera, 2008).

Faisant partie des cyanobactéries, les spirulines sont donc une des plus anciennes formes de vie «photosynthétique» apparue sur la terre il y a environ trois milliards et demi d'années. La spiruline est considérée souvent comme une algue planctonique microscopique. C'est en fait une bactérie appartenant aux cyanobactéries filamenteuses du genre *Arthrospira*, le plus souvent enroulée en spires. Riche en protéines, vitamines, oligo-éléments, molécules complexes, la spiruline permet de couvrir de nombreuses carences nutritives (Girardin, 2005).

Arthrospira platensis utilisé pour traiter plusieurs types d'eaux usées en raison de ses performances élevées en matière de récupération de l'azote, de sa valeur économique et de son potentiel environnemental (Chang *et al*, 2013– Champagne, 2015).

5- Morphologie

La spiruline est une cyanobactérie appartenant aux bactéries Gram négatif et pouvant être unicellulaire ou pluricellulaire. Elle est photo-autotrophe. La spiruline possède en moyenne une longueur de 250µm. Elle est constituée de cellules transparentes empilées bout à bout appelées filaments ou trichomes. Ces derniers ont un diamètre de 10 à 12 µm, sont mobiles, non ramifiés, et enroulés en 6 ou 7 spires. L'enroulement du trichome sur lui-même s'effectue suivant le sens d'un

minuscule ressort à l'origine de son appellation : «spiruline» du latin «spira»qui signifie enroulement. Plusieurs facteurs environnementaux peuvent influencer l'orientation de l'hélice. Cette forme hélicoïdale typique lui permet de se déplacer dans l'eau en adoptant le mouvement d'une vis, à une vitesse de 5µm par seconde. On parle alors de déplacement par motilité (**Charpy et al, 2008**). Les filaments de *Arthrospira platensis* sont motiles, se déplaçant souvent par des mouvements en vrilles à plus de 5µ par seconde, sa motilité lui sert à se protéger des expositions trop fortes au soleil (**Fox, 1999**).

Cependant, les spirulines présentent différentes formes. On trouve des formes spiralées classiques (Figure 4A), ondulées (Figure 4B) et parfois droites (Figure 4C). Cette particularité est en relation directe avec les conditions écologiques rencontrées dans leur habitat. (**Goulambasse, 2018**).

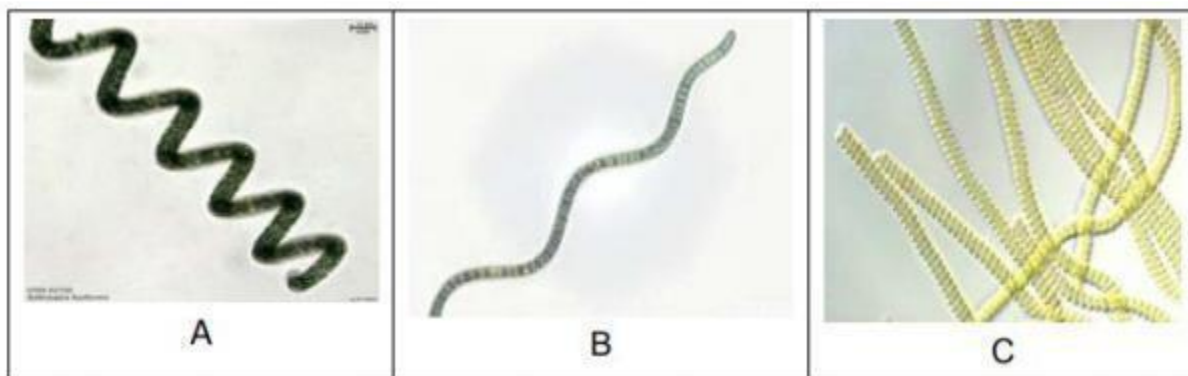


Figure (I.4) : Différents aspects de la spiruline (Goulambasse, 2018).

6- Habitat et répartition géographique

On distingue le genre *Arthrospira* des autres cyanobactéries par le milieu naturel dans lequel il se développe. En effet, la spiruline se développe préférentiellement dans des eaux douces et chaudes, alcalines (pH 8-11,5) et minéralisées (nitrate, phosphates, fer) riches en carbonate de sodium (Na_2CO_3) ou bicarbonate de sodium (NaHCO_3) excluant ainsi la plupart des autres microorganismes (**Charpy et al., 2008**).

La spiruline se développe dans des lacs alcalins riches en sels minéraux des régions chaudes et ensoleillées, soit dans une zone tropico-équatoriale entre la 35° latitude nord et 35° latitude Sud (zone qui comporte en Afrique: Tchad, Kenya, Tanzanie (lac Natron), Djibouti, Éthiopie, Congo, Zambie, Algérie, Soudan, et Tunisie; en Europe: France, Corse, Espagne; en Asie: Inde, Thaïlande, Myanmar, Sri Lanka, Pakistan, Chine et en Amérique: Pérou, Mexique, Uruguay, Équateur, Californie, Haïti, République Dominicaine)

Son habitat naturel est une eau :

- natronée (contenant du bicarbonate de sodium naturel) dont le pH doit être compris entre 8,5 et 11.
- saumâtre (de 20 à 70 g de sel par litre d'eau).

- chaude (entre 35 et 40°C), la croissance varie durant la journée, en dessous de 15°C et au-dessus de 39°C, elle s'arrête.
- où le rayonnement solaire est important (donc soit sous les tropiques soit en altitude).
- riche en nutriments apportés par les affluents des lacs et des sols (fer, azote, urée, acide phosphorique, sulfate de magnésium...).
- riche en gaz carbonique et oxygène (**Manet, 2016**).

On la retrouve ainsi dans les lacs alcalins en Afrique, en Amérique latine, et en Asie du sud. Il s'agit certes d'un organisme cosmopolite mais il est beaucoup moins abondant en Amérique du Nord et en Europe (figure I.5) (**Ahounou, 2018**).

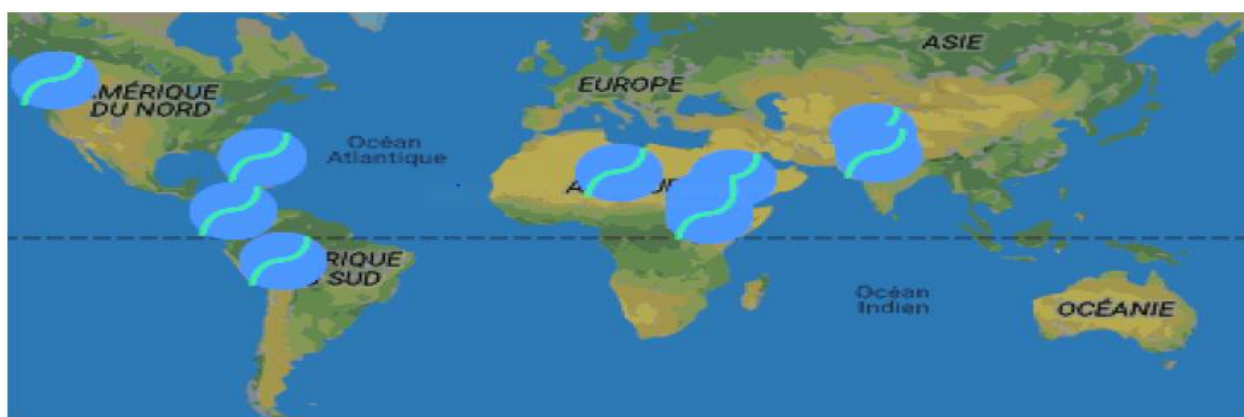


Figure (I.5) : Répartition géographique de la spiruline. (Fox, 1999)

7- Classification taxonomique

La classification systématique de la spiruline a été étudiée par plusieurs auteurs. Considérer comme une algue à l'origine, une désignation finale en tant que cyanobactérie a été adoptée et acceptée par la suite pour figurer au «Bergey's Manual of Determinative Bacteriology» (**Goulambasse, 2018**).

D'un point de vue taxonomique, la spiruline s'y verra appartenir par les systématiciens au :

Règne : Monera

Groupe ou Sous Règne : Procaryotes

Embranchement : Cyanophyta

Classe : Cyanophyceae

Ordre : Nostocales (ou Oscillatoriales)

Famille : Oscillatoriaceae

Genre : Oscillatoria

Sous genre : *Spirulina* ou *Arthrospira* (**Charpy et al. 2008**).

Les deux espèces les mieux connues sont *Spirulina platensis* (*S. platensis*), originaire d'Afrique et *Spirulina maxima* (*S. Maxima*) originaire d'Amérique centrale (**Sguera, 2008**).

8- Cycle biologique de reproduction

La spiruline se reproduit suivant un mode végétatif, une multiplication asexuée qui suit le principe de la bipartition par scission simple. C'est donc une segmentation des filaments qui s'effectue en plusieurs étapes.

- Une fois la maturité atteinte, les filaments de la spiruline forment des nécridies, des cellules ayant un aspect concave.
- Il s'ensuit une fragmentation du trichome à partir des nécridies aboutissant à de nouveaux filaments constitués de 2 à 4 cellules appelées hormogonies. Ces derniers croissent par division binaire et prennent la forme typique hélicoïdale, chacune des cellules donne deux cellules par scissiparité (figure I.6) (Manet, 2016).

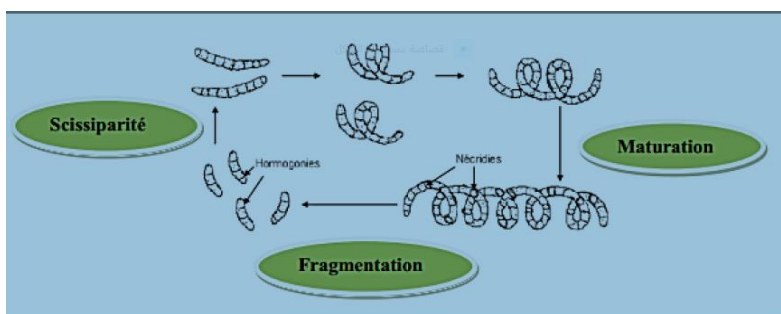


Figure (I.6) : Cycle biologique de reproduction de la spiruline (Charpy *et al*, 2008).

9- Composition

9-1- Protéines

La spiruline comprend dans sa composition entre 60 et 70% de protéines, 15% de glucides, 6% de lipides, 7% de minéraux et de 3 à 6% d'eau (Figure I.7) (Niangoren, 2017).

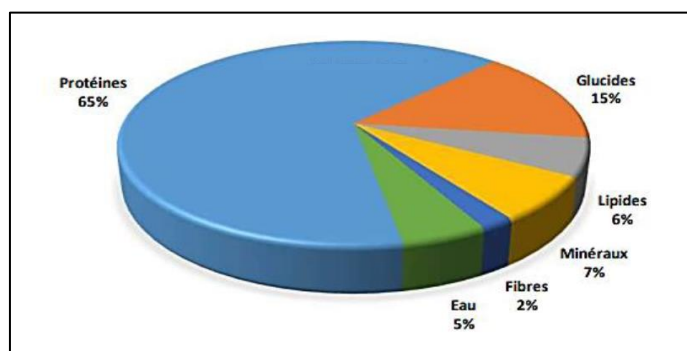


Figure (I.7) : Composition chimique de la spiruline (Lecointre, 2017).

La teneur en protéines de la spiruline est élevée avec des variations de 10 à 15% selon le moment de la récolte. Plus la luminosité est élevée, plus le pourcentage en protéines est élevé. (Goulambasse, 2018).

9-2- Glucides

Les glucides constituent 15 à 25 % de la matière sèche des spirulines dont les différents Composants sont présentés par le tableau (I.1).

Tableau (I.1) : Composition en pourcentage en éléments glucidiques de la spiruline (**Charpy et al, 2008**) :

Eléments chimiques	Pourcentage
Glucides simples et polyols à petites molécules	Trace
Glucosane	1,9
Rhamnosanne	9,7
Cyclitol	2-3
Immulina	0,5 – 2
Polysaccharides sulfates	NC

9-3- Lipides

La spiruline n'est pas un aliment gras, les lipides ne représentent, généralement, que 6 à 8% de son poids sec, mais ce pourcentage peut atteindre 11% selon les modes d'extraction ou la souche de spiruline utilisée. La composition en lipides totaux se caractérise par un bon équilibre entre acides gras saturés et acides gras polyinsaturés. Elle se subdivise en deux fractions : une fraction saponifiable «ou acides gras» (83%) et une fraction insaponifiable (17%). (**Goulambasse, 2018**).

9-4- Acides nucléiques

On rapporte des valeurs de 4,2 à 6 % d'acides nucléiques totaux dans la matière sèche chez *Arthrospira platensis*. (**Ross et al. 1990**)

9-5- Vitamines

Il existe 13 vitamines, 4 liposolubles et 9 hydrosolubles. La spiruline contient de nombreuses d'entre elles et spécialement des vitamines B dans des proportions optimales (**Sguera, 2008**) et suivant le tableau (I.2) (**Charpy et al. 2008**).

Tableau (I.2) : Teneur en vitamines en µg/g de matière sèche de spiruline (Charpy *et al.* 2008).

Vitamine	Teneur
B1 (thiamine)	34-50
B2 (riboflavine)	30-46
B3 (niacine)	130
B5 (pantothénate)	4,6-25
B6 (pyridoxine)	5-8
B8 (biotine)	0,05
B9 (folate)	0,5
B12 (cobalamine)	0,10-0,34
C (acide ascorbique)	Traces
Provitamine A (β-carotène)	700-1700
Cryptoxanthine	100
Vitamine E (alpha-tocophérol)	120

9-6- Minéraux

La spiruline contient tous les minéraux essentiels (7% du poids sec). Selon le pH et la composition du milieu de culture, elle absorbe plus ou moins les minéraux d'où des teneurs variables (Goulambasse, 2018).

Les minéraux spécialement intéressants dans la spiruline sont le fer, le zinc, le magnésium, le calcium, le phosphore et le potassium. tableau (I.3) (Dansou, 2002).

Tableau (I.3) : Composition en minéraux de la spiruline et doses requises (Goulambasse, 2018).

MINERAUX TENEUR	(MG/KG) DOSES REQUISES	(MG/JOUR)
Calcium	1300-1400	1200
Phosphore	6700-9000	1000
Magnésium	2000-2900	250-300
Fer	580-1800	18
Zinc	21-40	15
Cuivre	8-10	1,5-3
Chrome	2,8	0,5-2
Manganèse	25-37	5
Sodium	4500	500
Potassium	6400-15400	3500
Sélénium	0,01-50	0,05

9-7- Enzymes

De nombreuses enzymes entrent aussi dans la composition de la spiruline, sortes de «facilitateurs» biologiques, dont l'exceptionnel SOD (superoxyde dismutase), qui représente une arme majeure contre l'oxydation ou le vieillissement cellulaire (**Ahounou, 2018**).

La biodisponibilité de la SOD est très importante grâce à la membrane de la spiruline dépourvue de cellulose (**Manet, 2016**).

9-8- Pigments

Les trois principaux pigments, contenus dans la spiruline, responsables de sa couleur sont la chlorophylle, la phycocyanine et la β carotène (**Sguera, 2008**).

9-8-1 - Chlorophylle

Le taux de chlorophylle contenu dans la spiruline est d'environ 1%, l'un des plus élevés que l'on puisse trouver dans la nature (**Ahounou, 2018**).

9-8-2- Phycocyanine

La spiruline contient de la phycocyanine. Il s'agit d'une protéine pigmentée dite «Complexe» et qui a une couleur bleue. C'est d'ailleurs cette protéine qui donne sa couleur bleutée à la spiruline. La phycocyanine a de nombreuses vertus médicinales et curatives. En effet, elle agit efficacement contre les attaques immunitaires du quotidien et aussi face à des pathologies plus sérieuses : comme les conséquences de la radioactivité et la chimiothérapie. De façon globale, elle protège notre ADN et notre foie. Enfin, elle anime la production de cellules souches (**Barth et Leo, 2019**).

9-8-3- La Béta-carotène

La bêta-carotène, pigment orange, précurseur de la vitamine A, aussi présent dans la spiruline en grande quantité, joue un rôle important dans le renouvellement des cellules et dans les défenses immunitaires (**Charpy et al, 2008**). Possédant de nombreuses propriétés anti-antioxydantes pour lutter contre le vieillissement des cellules, il permet aussi de réduire les risques de cancer, favoriser la cicatrisation des plaies et protège la peau des agressions extérieures (tableau I.4) (**Perraut, 2017**).

Tableau (I.4) : Teneurs en pigments exprimées en mg pour 10g de matière sèche de *Arthrospira platensis* (Pierlovisi, 2007).

Pigments	Teneur en mg/10g
Chlorophylles totales	115
Chlorophylle a	61-75
Phycocyanine (bleu)	1500-2000
Caroténoïdes (orange)	37
Phycoérythrine (rouge)	2900-10000

10-Culture et production de la spiruline

10-1- Milieu de culture

Il s'agit d'une solution de sels minéraux dans l'eau. Ce liquide doit apporter à la spiruline tous les éléments chimiques qui lui sont nécessaires. La culture doit se faire dans une eau à la fois salée et alcaline. L'eau utilisée pour le milieu de culture doit être de préférence potable ou au moins filtrée (JOURDAN, 2018). La spiruline a également besoin pour sa croissance des engrais contenant l'azote, phosphore, potassium, qui sont les trois principaux éléments, mais soufre, magnésium, calcium et fer doivent aussi être ajoutés s'ils ne sont pas apportés en quantité suffisante par l'eau, le sel et les engrais. Le tableau (N°I.5) donne la composition chimique d'un milieu de culture typique (JOURDAN, 2018).

Tableau (I.5) : Analyse d'un milieu de culture typique (JOURDAN, 2018).

Eléments	Concentration en mg /l
Carbonate	2800
Bicarbonate	270
Nitrate	614
Phosphate	25
Sulfate	350
Chlorure	3030
Sodium	4380
Potassium	642
Magnésium	10
Calcium	5

Ammonium	5
Fer	1
Salinité totale	12797
Densité à 20°C	1010 g/l

10-2- Paramètres de culture

L'un des plus grands avantages de la culture de la spiruline comparée aux autres types de cultures est sa croissance dans des conditions extrêmes (salinité et alcalinité), permettant ainsi d'exclure la prolifération de la plupart des autres microorganismes (**Benahmed Djilali, 2012**).

10-2-1- Température

Les premiers repères concernant les températures sont à peu près les mêmes que pour l'homme, 37°C : température idéale pour pousser. Au-dessus, c'est trop chaud (43°C peut être mortel). En dessous, la vitesse de multiplication baisse avec la température. A 20°C la croissance est pratiquement stoppée. La température du milieu de culture doit donc se situer entre ces deux températures. Plus la « saison » est longue, plus la période de récolte est longue. Les climats continentaux ou d'altitude sont désavantagés. (**Jourdan, 2018**).

10-2- 2- Lumière

La lumière influent directement sur la croissance de la spiruline qui assuré par la photosynthèse ainsi que une forte intensité lumineuse peut conduire à la photolyse et pour l'éviter, il est convenable de vérifier deux conditions nécessaires (**Fox D.1999**) :

- Ensemencer le bassin avec une forte concentration afin que la lumière n'atteint pas à la fond de bassin, et la mesure de la concentration et apporté par de disque Secchi
- Une agitation suffisante

10-2-3- Le potentiel d'hydrogène

Le pH du milieu de culture doit être compris entre 8et 11.pour obtenir une bonne croissance de la spiruline.

L'alcalinité est habituellement apportée par du bicarbonate de sodium (NaHCO₃), mais ce dernier peut être remplacé, en partie ; par de la soude caustique ou du carbonate de sodium (Na₂CO₃) pour relever le pH initial du milieu de culture (**FOX, 1999**).

10-2-4- Agitation

Elle est nécessaire pour assurer une bonne culture, au moins (2-4) fois par jour, qui augmente avec l'intensité de la lumière, Le mode d'agitation peut être : manuelle avec un balai ou électrique avec une pompe ou une roue à aubes, l'agitation peut être continue si on utilise une pompe avec sans danger sur la spiruline. L'agitation nocturne continue favorise nettement l'autoépuration de milieu (**Jordan, 2018**).

10-2-5- Salinité

La salinité est apportée par des fertilisants et du sel (chlorure de sodium).

Le sel de cuisine peut être utilisé mais il contient souvent 2% de magnésie insoluble pouvant être à l'origine d'excès de boues minérales (**Jourdan, 2018**).

Les fertilisants autorisés dans l'agriculture biologique (AB) sont des composés minéraux ayant une origine organique. Ils proviennent par exemple du compostage de fumier.

10-2-6- L'ombrage

En l'absence de supplémentation en carbone le pH peut monter à 11,5 et plus, mais la spiruline ne peut supporter longtemps un pH supérieur à 11,3. Un demi-ombrage suffit généralement à maintenir le pH en dessous de 11. Si l'agitation est bonne, on peut empêcher la montée excessive du pH sans mettre d'ombrage en maintenant un stock de spiruline élevé (>150 g/m²), c'est-à-dire une concentration en spiruline supérieure à environ 0,7 g/l pour une hauteur de liquide de 20 cm, ce qu'on peut appeler faire un "auto-ombrage".

L'ombrage est par ailleurs nécessaire quand la température de la culture est trop basse (< 10°C) par grand soleil, sinon la culture peut facilement mourir par photolyse (**Jourdan, 2018**).

10- 3- Les différents modes de production de Spiruline

La production de Spiruline se fait à plusieurs échelles : artisanale, semi-industrielle et industrielle. Les éléments de différenciation de ces modes de production sont la surface totale des bassins de culture et leurs surfaces unitaires, les moyens et matériaux utilisés, les degrés de technologie, les objectifs. Le processus de fabrication de la Spiruline passe cependant par les mêmes étapes obligatoires, lesquelles seront décrites ci-après, sur la base des méthodes artisanales. (**Charpy, 2008**)

10-3-1- Cultures artisanales

Dans ce mode de culture, on utilise des systèmes qui consomment moins d'énergie, avec des moyens pas chers, simples et efficace.

Selon les conditions locales, Elle est cultivée en petits bassins en bâches plastique, en dur, ou en argile couverte avec des planches en bois, films en plastique ou tout autre type de toits (parfois sous

serres), permettant de le protéger contre l'excès de pluies, le vent de sable, les feuilles d'arbres...etc. Ils doivent être installés d'une manière facile à vider et à nettoyer avec un system d'agitation électrique ou manuelle par roue à aubes (Figure I.8) (Jourdan, 2018).



Figure (I.8) : Diverses cultures artisanales de spiruline (Jourdan, 2018)

L'eau potable, de pluie, de puits, de forage, de mer et toutes autres sources propres et neutres peuvent être utilisée à ce niveau après avoir été filtrées, L'aliment principal de la spiruline est le carbone dont la source normale est le gaz carbonique (vient de l'air) et le bicarbonate de sodium, les autres nutriments peuvent n'être ajoutés qu'une fois par semaine (figure I.9) (Jourdan,2018).



Figure (I.9) : Bassin contenant de la spiruline (Ahounou, M. N.2018).

Toutes les règles de santé, hygiènes et de sécurité doivent être respectées tout au long de la production afin d'obtenir un produit de haute qualité pour la consommation humaine.

10-3-2- Production Industrielle et semi-industrielle

La production à grande échelle de la spiruline pour la culture de masse doit être réalisée dans des zones où les conditions climatiques sont favorables, il est difficile d'avoir une croissance idéale en

raison de différents facteurs environnementaux, en particulier la température et le soleil tout au long de l'année. Elle est souvent destinée vers la production de compléments alimentaires, mais, plus récemment, une attention particulière a été accordée à *Arthrospira platensis* en tant qu'une source potentielle de produits pharmaceutiques (figure I.10) (Usharani, G.2012).



Figure (I.10) : Des bassins améliorés à Hawaï (Théodore, Z. G. H. C. (2017).

Les bassins ouverts sont moins chers, ils s'étendent sur de grandes surfaces et utilisent les rayons de soleil ce qui fait économiser des coûts supplémentaires au producteur. Le problème posé par ce type de bassins est qu'ils restent toujours soumis à la poussière, les insectes, les pluies, les animaux ...etc. Elle doit donc subir un processus de filtrage efficace, et être complètement protégé contre l'accès d'animaux ou de tout étranger. C'est pourquoi il est préférable de construire les bassins sous serres, en tout cas, chaque lot de production n'est vendu qu'après contrôler et assurer sa qualité (Théodore, Z. G. H. C. 2017).

La spiruline est placée dans les conditions optimales aussi strictement que possible, les producteurs utilisent la recherche scientifique pour atteindre cet objectif. Les bassins de production, les lampes d'éclairages, les ventilateurs, les pompes d'eaux, le système de chauffage, et toutes autres équipements industriels sont construits et placés selon des normes et des conditions très saines. Chaque fabricant à ce niveau doit disposer d'un laboratoire pour suivre chaque étape ainsi que pour contrôler la qualité de chaque lot de production (figure I.11) (Théodore, Z. G. H. C. 2017).



Figure (I.11) : Exemples de bassins (Théodore, Z. G. H. C. 2017).

Afin de maximiser le rendement de production, les chercheurs ont amélioré un système permet la culture de spiruline en photo bioréacteurs (des équipements dans lequel on cultive des micro-organismes pour faciliter le contrôle de milieu, les conditions, la surveillance et la gestion de culture), grâce à ces appareils, il est devenu possible de cultiver la spiruline durant toute l'année, même dans les climats tempérés trop froids et dans les conditions optimales (figure I.12) (*Sguera, S. 2008*).



Figure (I.12) : Photo d'une unité de production microalgues par photobioréacteurs (*Sguera, S. 2008*)

11- Activités biologiques de la spiruline

En plus de sa valeur nutritive élevée, la spiruline présente de nombreuses activités biologiques telles que l'activité antioxydante, anti-inflammatoire, anti-cancéreuse, antimicrobienne, anti-diabétique et obésité et anti-toxicité (*Shao et al, 2019*).

11-1- Activité antibactérienne

Certaines études préliminaires *in vitro* d'extraits de spiruline sur quelques bactéries pathogènes (*Escherichia coli* (*E. coli*) et *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*)) ont permis d'observer un potentiel antimicrobien efficace (*Qureshi et Hunter, 1995*).

Ce résultat, certifie la possession de la cyanobactérie d'un mécanisme de défense pour lutter contre les bactéries pathogènes et donc une perspective de mettre au point ou de développer un antibiotique (agent antimicrobien) à base de plante, sûr et prometteur avec moins d'effets secondaires pouvant substituer à des médicaments synthétiques (*Al-ghanayem, 2017*).

Les résultats des différents extraits de spiruline sur diverses bactéries n'ont pas permis à ce jour de définir une substance anti-bactérienne particulière mais un spectre d'action qui serait un support pour démontrer le potentiel de cette activité sur quelques germes pathogènes (*Kaushik et Chauhan, 2008*).

11-2- Activité anti-oxydante

Les principaux actifs antioxydants qui confèrent un statut indétrônable d'antioxydant puissant à la spiruline sont : la phycocyanine, la bêta carotène, les polyphénols, le superoxyde dismutase (SOD) et d'autres vitamines et minéraux contenus dans cette matière.

De nombreuses études *in vitro* et *in vivo* ont identifié cette activité potentielle de la spiruline (ou de ses extraits) et ont montré que le traitement à la spiruline réduit significativement le stress oxydatif (Goulambasse, 2018).

11-3- Activité antimicrobienne

Un grand nombre de produits et/ou d'extraits extracellulaires d'algues ont été signalés comme agents antimicrobiens (anti-viraux, anti-bactériens, anti-fongiques, anti-protozoaires), bien que la structure et l'identité détaillée de la substance active les constituants de bon nombre d'entre eux ne sont pas encore connus (Borowitzka, 1995). Parmi les micro-algues, la spiruline gagne de plus en plus la considération en tant qu'agent anti-microbien naturel (Shao *et al* ; 2019).

11-4- Activité anticoagulante

Le Spirulane Calcique (Sp-Ca) agirait en activant le cofacteur II de l'héparine, molécule qui inhibe la thrombine, donc la coagulation. Le Spirulane Sodique (Sp-Na), autre polysaccharide sulfaté spécifique à la Spiruline, aurait aussi des effets anticoagulants (Charpy, L. *et al* ;2008)

11-5- Hépatite C

Des essais cliniques avec 30 patients contre les infections virales sont effectué, parmi 30 cas, quatre ont atteint l'état d'ETR (End-of-Treatment Response) signifie qu'il n'y a pas de virus de l'hépatite C détectable dans le sang à la fin du traitement avec la spiruline. Le virus de l'hépatite C peut réapparaître dans le sang après la fin du traitement. Les chercheurs ont conclu que la spiruline avait un usage thérapeutique potentiel contre l'infection virale et ils ont également suggéré la nécessité de poursuivre les essais cliniques avec plus d'échantillons (Yakoot, M., & Salem, A ;2012).

11-6- Activité anticancéreuse

Différentes études et analyses d'experts, ont affirmé que la bêta-carotène, un des antioxydants implanté dans la spiruline, pourrait inverser le processus cancéreux et inhiber le déploiement des cellules cancérigènes. Une de ces analyses confirmatives du résultat fut élaborée avec des personnes qui avaient une leucoplasie buccale (état précancéreux de la bouche). Ces derniers, ont montré après une prise quotidienne d'1g de spiruline pendant un an une amélioration de leur état et réussirent à arrêter le développement de la pathologie. La phycocyanine intervient aussi dans cette activité en s'attaquant aux radicaux libres responsables du cancer (Vidalo, 2015).

12- Principales applications de la spiruline

12-1- En alimentation humaine

Grace à son excellent profil nutritionnel, la spiruline peut générer plusieurs performances :

- En enrayant la malnutrition, elle est utilisée par des humanitaires et des médecins sous forme de poudre afin de la mélanger à des céréales ou à de l'eau, pour sauver des enfants atteints de malnutrition sévère. Elle se révèle plus efficace que les médicaments pour pallier toutes les carences et traiter les effets des maladies qui découlent de la famine comme le marasme ou la kwashiorkor **(Fox, 1999)**.
- Pour les sportifs, sa consommation facilite l'effort et permet une meilleure récupération ;
- Considérer comme une excellente source de vitamines B9 et B12 ainsi que de fer **(Evoli conseil, 2014)**.

12-2- En alimentation animale

Comme pour l'homme, la spiruline renforce aussi les défenses naturelles de l'animal. Elle joue un grand rôle dans le maintien de son système immunitaire, lui permet de lutter contre certaines maladies et agit contre son vieillissement et sa fatigue. Les chiens, les chats, les poissons et les chevaux sont les animaux pour lesquels la spiruline est couramment utilisée. Chez les chevaux, sa consommation est très courante pendant la phase de croissance, de compétition ou de convalescence. Notons aussi que les bons éleveurs de poules n'hésitent pas à ajouter de la spiruline à leur alimentation. C'est une pratique de connaisseur qui participe à la ponte d'œuf d'une qualité nettement supérieure **(Casal, 2019)**.

12-3- En cosmétique

Grâce à ses propriétés anti-oxydantes qui empêchent la formation de radicaux libres, la spiruline améliore la souplesse et l'élasticité de la peau et donc retarde son vieillissement et apporte brillance et résistance aux ongles et aux cheveux par les nutriments et les oligoéléments qu'elle concentre **(Banks, 2007)**.

12-4- En thérapeutique

- Le traitement des carences nutritionnelles (malnutrition protéino-énergétique, anémie ferriprive et hypovitaminose).
- Le renforcement des défenses immunitaires (une opportunité pour lutter contre les maladies opportunistes).
- Et le traitement de certaines affections dermatologiques.
- Elle constitue également un partenaire efficace pour calmer les douleurs rhumatismales et l'arthrose, la lutte contre l'ostéoporose, l'excès de cholestérol, l'hypertension, et les allergies. Elle protège le cœur et augmenterait la régénération des cellules cérébrales **(Evoli conseil, 2014)**.

Chapitre II
Généralités sur les eaux usées

1- Définition d'une eau usée

Les eaux usées sont une conséquence des activités humaines, qui comprennent les effluents de déchets domestiques, agricoles et industriels. La plupart des eaux usées provenant de sources domestiques contiennent des nutriments, des solides en suspension, des métaux lourds, des agents pathogènes, des matières exigeantes en oxygène et des matières organiques inorganiques et réfractaires dissoutes. Les eaux usées industrielles pourraient contenir des matériaux xénobiotiques en plus de ceux des eaux usées domestiques (**Rajeev, et al, 2019**).

2- Composition des eaux usées

Les eaux usées sont un mélange composé d'éléments organiques, inorganiques et artificiels. Les trois quarts du carbone organique dans les eaux usées sont des protéines, des glucides, des graisses, des aminoacides et des acides volatils. Les parties inorganiques comprennent une grande quantité de calcium, de potassium, de sodium, de magnésium, de chlore, de soufre, de phosphate, de bicarbonate, d'ammonium et de métaux lourds.

Dans l'affluent des eaux usées, l'azote est présent sous forme d'ammonia (NH_4^+), de nitrite (NO_2^-), ou de nitrate (NO_3^-). Le phosphore est présent sous forme de phosphates (PO_4^{3-}) dans les eaux usées. Les eaux usées municipales contiennent plusieurs polluants de métaux lourds tels qu'un arsénique. Cadmium, chrome, cuivre, plomb, mercure. et zinc.

Les eaux usées Agricoles dérivées de fumier animal contiennent de concentrations de N et P > 1000 mg. Le ruissellement agricole se compose de herbicides, de fongicides, et d'insecticides.

Les eaux usées industrielles contiennent de N et de P que les eaux usées agricoles et municipales. il contient des niveaux élevés de polluants de métaux lourds tels que Cr, Zn et Cd et de toxine chimique telles que les hydrocarbures, les biocides et les surfactants. Les effluents des industries du textile, du tannage, du cuir, de la galvanoplastie et de la transformation des métaux associés contiennent des quantités considérables d'ions métalliques toxiques (**S. K. Gupta, F. Bux (eds.) ,2019**).

3- Caractéristiques des eaux usées

3-1- Caractéristiques physiques

La température des eaux usées est un facteur critique car elle influence les réponses des formes de vie aquatiques. La température est également extrêmement critique pour décider des valeurs d'autres facteurs tels que le pH de l'eau, la conductivité, les concentrations de gaz dans l'eau et diverses plages d'alcalinité. La couleur des eaux usées ménagères est

comme une démonstration de son âge. Les odeurs se manifestent dans les eaux usées en raison de leur état en raison des organismes aquatiques vivants et en décomposition et de la montée des gaz. L'odeur émise par les eaux usées septiques est de, la production de sulfure d'hydrogène par des micro-organismes anaérobies (S. K. Gupta, F. Bux (eds.) ,2019).

3-2- Caractéristiques chimiques

Le carbone, l'hydrogène et l'oxygène constituent des composés organiques avec d'autres composants critiques tels que le soufre, le phosphore, les fers et l'ammoniac qui sont présents dans les eaux usées. La présence d'ammoniac dans les eaux usées peut être reconnue comme la preuve chimique de la contamination naturelle. Comme la substance organique, il y avait des proportions considérablement plus grandes de matière azotée présente dans les eaux usées avec les composants des hydrates de carbone, des acides gras et de l'urée. Il existe certains composés inorganiques comme l'azote, le phosphore, le soufre et certains métaux lourds (S. K. Gupta, F. Bux (eds.) ,2019).

3-3- Caractéristiques biologiques

Les eaux usées abritent de nombreux organismes, y compris des macro et micro-organismes. La quantité de toute espèce de ces organismes dans une masse d'eaux usées dicte les exigences de traitement. Les eaux usées constituent un milieu parfait pour le développement microbien potentiel .Tableau1 (S. K. Gupta, F. Bux (eds.) ,2019).

Tableau (II.1) : Caractéristiques des eaux usées et leurs sources (Rajeev, et al, 2019).

Caractéristiques	Source
Couleur	Eaux usées domestiques, effluents industriels, matières organiques non décomposées
Odeur	Eaux usées, déchets industriels
Solide	Alimentation en eau municipale, eaux usées industrielles, érosion des sols, infiltration d'afflux
Ph et température	Eaux usées urbaines et industrielles
Contenu organique	Eaux usées commerciales et industrielles
Huiles et graisse	Eaux usées et eaux usées industrielles
Pesticides	Ruissellement agricole
Phénols	Effluents industriels
Protéines et graisses	déchets d'eaux usées commerciales et industrielles
Alcalinité	Alimentation en eau domestique, infiltration d'eaux

	souterraine
Chlorures	Déchets domestiques, fourniture d'eaux domestique
Métaux lourds	Effluents industriels, ruissellement de l'agriculture. infiltration des eaux souterraines
Azote et phosphore	Eaux usées, déchets commerciaux et industriels, ruissellement naturel
Animaux, plantes et microbe	Cours d'eau à ouverts, usines de traitement et déchets domestiques

4- Origine des eaux usées

4-1- Eaux usées domestiques

Elles parviennent des différents usages domestiques de l'eau, elles sont constituées essentiellement d'excréments humains. Des eaux ménagères de vaisselle chargées de détergents, de graisses appelées eaux grises et de toilette chargées de matières organiques azotées, phosphatées et de germes fécaux appelées eaux noires (**METAHRI, M, S, 2012**).

4-2- Eaux usées industrielles

Les eaux usées industrielles regroupent toutes les eaux qui sont en principe rejetées par l'usine dans le milieu extérieur, après avoir contribué à la fabrication, au nettoyage, au transport, au refroidissement. De façon générale, elles se composent des :

- eaux de fabrication,
- eaux des circuits de refroidissement,
- eaux de lavage des sols et des machines,
- rejets des services généraux.

Selon le dernier rapport de l'agence des Nations Unies chargée des questions de l'eau, l'industrie est l'activité humaine qui génère le plus d'eaux usées (Figure II.1). La composition et la concentration des effluents industriels sont extrêmement variables suivant le type d'industrie. Ainsi, chaque opération industrielle génère des quantités et qualités spécifiques d'eaux usées. Les principales caractéristiques physiques des eaux usées industrielles sont la teneur en matières solides, le pH, la salinité, la couleur, l'odeur et la température tandis que parmi les principales caractéristiques chimiques, on peut noter la matière organique (demande chimique en oxygène (DCO), demande biologique en oxygène (DBO5), carbone organique total (COT), l'azote (ammoniacal, organique, nitrite, nitrate), le phosphore (organique et inorganique) (**Boukary, S. 2018**).

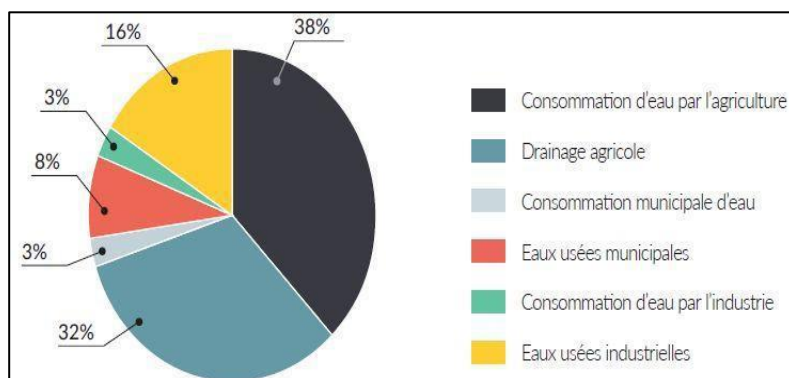


Figure (II.1) : Consommation d'eau et production d'eaux usées par les principaux secteurs (Boukary, S. 2018).

4-3- Eaux pluviales

Les eaux de pluie ruissellent dans les rues ou sont accumulées polluantes atmosphériques, poussières, débris, suies de combustion et hydrocarbures rejetés par les véhicules.

Les eaux de pluie collectées normalement à la fois avec les eaux usées puis déversées dans la canalisation d'assainissement et acheminées vers une station d'épuration, sont souvent drainées directement dans les rivières entraînant ainsi une pollution intense du milieu aquatique (METAHRI, M, S, 2012).

4-4- Eaux usées agricoles

Il s'agit de rejets liquides et agricoles issus du ruissellement d'eaux d'irrigation qui entraîne des engrais et des pesticides, des herbicides ou des rejets organiques dus à un élevage important. Les pollutions dues aux activités agricoles sont de plusieurs natures :

- Apport aux eaux de surface de nitrates et de phosphates utilisés comme engrais, par suite de lessivage de terres perméables. Ces composés minéraux favorisent la prolifération des algues (phénomène d'eutrophisation) qui en abaissant la teneur en oxygène des eaux courantes, compromettent la vie des poissons et des animaux aquatiques.
- Apport des pesticides chlorés ou phosphorés, de désherbants et d'insecticides.
- En région viticole, apport de sulfates de cuivre, de composés arsenicaux destinés à la protection des vignes (RICHARD, 1996).

5- Effets des eaux usées

La qualité de l'eau des rivières et des lacs, qui sont la principale source d'eau potable, se dégrade continuellement en raison du rejet des eaux usées. Cela peut entraîner diverses

maladies d'origine hydrique, notamment le choléra, les maladies rénales, les maladies cardiaques, la diarrhée et la dysenterie. De plus, les eaux usées rejetées sur terre peuvent s'infiltrer dans les nappes phréatiques souterraines et contaminer les eaux souterraines, ce qui les rend impropres à l'utilisation. Le rejet d'eaux usées provoque l'eutrophisation des organismes aquatiques, qui endommage la flore et la faune qui poussent dans l'eau, ainsi que perturbe la chaîne alimentaire et le réseau trophique de l'écosystème. De même, les eaux usées utilisées dans l'irrigation contiennent des éléments nutritifs élevés, des éléments toxiques et des contaminants organiques qui peuvent affecter la production des cultures. **(Rajeev, et al, 2019)**

6- Pollution de l'eau

La pollution est due à toute substance physique, chimique ou biologique rejetée dans une eau naturelle qui perturbe l'équilibre de cette eau, induit d'importantes (nuisances mauvaise odeur, fermentation, risques sanitaires, etc **(Ladjet, 2006)**).

6-1- Pollution physique

IL s'agit d'une pollution qui se traduit par la présence des particules de taille et de matière très variés dans l'eau, qui lui confèrent un caractère trouble. On distingue aussi les matières décantées (plus lourdes que l'eau), les matières flottables (plus légères que l'eau) et les matières non séparables (de même densité que l'eau) **(Bouziani, 2000)**.

La pollution physique désigne l'autre type de pollution, telle que la pollution thermique due aux températures élevées, qui cause une diminution de la teneur en oxygène dissous ainsi qu'une réduction de la solubilité des gaz et la pollution radioactive **(Boudeal, Djoud 2003)**.

6-2- Pollution chimique

La pollution chimique de l'eau est due essentiellement aux déversements polluants organiques et des sels de métaux lourds par les unités industrielles **(Aroua, 1994)**.

L'enrichissement des sols pour intensifier l'agriculture par diverses catégories d'engrais et de pesticides est également à l'origine de la pollution chimique des sources et des nappes souterraines **(Aroua, 1994)**. Ces substances exercent un effet toxique sur les matières organiques et les rendent plus dangereuse. Les polluants chimiques sont classés en cinq catégories **(Boudeal, Djoud, 2003)**.

Les polluants chimiques dits indésirables (nitrate, les composés phosphorés et les sels ammoniacaux :

- Les polluants chimiques toxiques

- Les pesticides et produits apparentés
- Les hydrocarbures
- Les détergents

6-3- Pollution biologique

Un grand nombre de microorganismes peut proliférer dans l'eau qui sert d'habitat naturel ou comme un simple moyen de transport pour ces microorganismes. Les principaux organismes pathogènes qui se multiplient ou qui sont transportés dans l'eau sont : les bactéries, les virus, les parasites et les champignons. On parle ainsi de pollution bactérienne, virale ou parasitaire (**Thomas, O. 1995**).

7- Traitement des eaux usées

Les eaux usées admises dans une station de traitement et, à la sortie, les effluents (les eaux usées épurées rejetées par la station de traitement), ont des propriétés permettant leur réincorporation dans des eaux naturelles comme les lacs ou les rivières, ou leur traitement ultérieur pour en faire de l'eau potable (**Madigan et Martinto, 2007**).

7-1-Prétraitement

La première étape du traitement consiste à débarrasser les effluents de tout élément susceptible de gêner le fonctionnement d'ouvrage (**Grosclaude, 1999**).

Le prétraitement comportant un certain nombre d'opérations à caractère physique ou mécanique. Le but est dans ce cas d'extraire et d'éliminer de l'eau les éléments solides en suspension ou en flottation et qui pourraient constituer une gêne pour les traitements ultérieurs. Il s'agit des déchets volumineux (dégrillage), des sables et graviers (dessablage) et des graisses (dégraissage déshuilage).

Ces traitements successifs sont :

- **Le dégrillage** il consiste à retenir les gros déchets solides au moyen de grilles à barreaux verticaux dont l'écartement varie entre 3 et 100 mm en fonction de l'efficacité voulue. Sont ainsi éliminés les bois, plastiques, papiers, bouteilles, feuilles qui sont susceptibles de provoquer des dégâts aux conduites et machines des différentes unités de l'installation. Ces éléments sont ensuite éliminés avec les ordures ménagères. Le tamisage, qui utilise des grilles dont l'espacement est plus réduit, peut compléter cette phase de prétraitement. Cependant, il génère beaucoup plus de déchets (**Grégorio et Badolt, 2007**).
- **Le dessablage** il débarrasse les eaux brutes des sables et des graviers par sédimentation, de manière à éviter l'abrasion des pompes et conduites en aval. L'écoulement de l'eau à une vitesse

réduite dans un bassin appelé "désableur" entraîne leur dépôt au fond de l'ouvrage. Ces particules sont ensuite aspirées par une pompe. Les sables récupérés sont essorés, puis lavés avant d'être soit envoyés en décharge, soit réutilisés, selon la qualité du lavage (**Grégorio et Badolt, 2007**).

- **Le dégraissage** il vise à éliminer la présence de graisses dans les eaux usées, graisses qui peuvent gêner l'efficacité des traitements biologiques qui interviennent ensuite. Les huiles et les graisses en principe flottent car leurs densités sont inférieures à celle de l'eau.

Le dégraissage s'effectue par flottation. L'injection d'air au fond de l'ouvrage permet la remontée en surface des corps gras. Les graisses sont raclées à la surface, puis stockées avant d'être éliminées (mise en décharge ou incinération). Elles peuvent aussi faire l'objet d'un traitement biologique spécifique au sein de la station d'épuration. De nombreuses stations utilisent des désableur-dégraisseurs combinés. Le temps de séjour dans ce type d'ouvrage est de 5 à 12 minutes (**Grégorio et Badolt, 2007**).

7-2- Traitement primaire (physico-chimique)

Enlèvement des solides organiques et inorganiques sédimentables ainsi que les matériaux flottants (**FAO, 2003**). Les procédés de traitement primaire sont physiques (par exemple, décantation plus au moins poussée) ou éventuellement physico-chimiques, et produisent des boues primaires. (**Vaillant, 1974**). Les traitements physico-chimiques permettent un bon abattement des virus (**Asano, 1998**).

Selon **FAO, (1992)** approximativement 25 à 50% de la demande biologique en oxygène (DBO₅), 50 à 70% du total des solides en suspension (SS) et 65% des graisses et huiles sont éliminés par décantation primaires.

7-3- Traitement secondaire (traitement biologique)

Enlèvement des matières organiques solubles et des matières en suspension des eaux usées traitées primaires (**FAO, 2003**). Les procédés d'épuration secondaire (ou biologique) comprennent des procédés biologiques, naturels ou artificiels, faisant intervenir des microorganismes aérobies pour décomposer les matières organiques dissoutes ou finement dispersées (**Desjardins, 1997**). La dégradation peut se réaliser par voie aérobie (en présence d'oxygène) ou anaérobie (en l'absence d'oxygène).

Ces traitements sont basés sur la capacité des micro-organismes à oxyder la matière minérale (NH₃...), et les matières constitutives de la DCO et de la DBO d'une part (aérobiose), et à réduire d'autre part les molécules comportant de l'oxygène : NO₃ (anoxie),

804 et C02 (anaérobie). Ils vont permettre ainsi d'éliminer la pollution soluble biodégradable et une partie de MES (**Grosclaude, 1999**).

7-3-1- Traitement secondaire aérobie

7-3-1-1- Boues activées

Les traitements réalisés en station d'épuration consistent à dégrader et séparer les polluants de l'eau (particules, substances dissoutes, microorganismes) par des procédés physiques, chimiques et biologiques pour ne restituer au milieu aquatique qu'une eau de qualité suffisante au regard du milieu récepteur.

Le résultat de ces opérations est la production de boues qui est le principal sous-produit du cycle de traitement de l'eau. Donc les boues d'épuration urbaines résultent du traitement des eaux usées domestiques qui proviennent de l'activité des particuliers et éventuellement des rejets industriels dans les réseaux des collectivités après avoir suivi un prétraitement obligatoire (**Céline PERNIN 2003**). Une station de traitement par boues activées comprend dans tous les cas :

- un bassin dit d'aération dans lequel l'eau à épurer est mise en contact avec la masse bactérienne épuratrice.
- un clarificateur dans lequel s'effectue la séparation de l'eau épurée et de la culture bactérienne.
- un dispositif de recirculation assurant le retour vers le bassin d'aération de la boue biologique récupérée dans le clarificateur.

Cela permet de maintenir dans ce bassin la quantité (ou concentration) de micro-organismes nécessaires pour assurer le niveau d'épuration recherché.

- un dispositif d'extraction et d'évacuation des boues en excès, c'est-à-dire du surplus de culture bactérienne synthétisée en permanence à partir du substrat,
- un dispositif de fourniture d'oxygène à la masse bactérienne présente dans le bassin d'aération.
- un dispositif de brassage de ce même bassin, afin d'assurer au mieux le contact entre les cellules bactériennes et la nourriture, (**Degrément, 1972**).

Selon Asano (1998), un traitement par boues activées élimine 90 % des bactéries entériques, 80 à 99 % des entérovirus et des rotavirus, 90 % de *Giardia* et de *Cryptosporidium*.

7-3-1-2- lits bactériens

L'autre méthode courante de traitement secondaire repose sur l'utilisation des filtres (lits) biologiques, et consiste à vaporiser les eaux usées sur un lit de roche ou de plastique moulé. Les éléments constitutifs du lit doivent être assez volumineux pour laisser l'air pénétrer jusqu'au fond, mais assez petits pour une maximaliser la superficie où a lieu l'activité bactérienne. Un film biologique constitué de microbes aérobies se développe à la surface des roches ou du plastique. Grâce à la circulation de l'air dans le lit, les micro-organismes du film transforment par oxydation une grande partie de la matière organique des eaux usées en dioxyde de carbone et en eau les filtres (lits) biologiques éliminent de 80 à 85% de la DBO, de sorte qu'ils sont généralement moins efficaces que le système d'activation des boues (**Gerard et al., 2003**).

7-3-1-3- disques biologiques

Constituent un autre système reposant sur l'utilisation de films biologiques et utilisé pour le traitement secondaire des eaux usées. Un ensemble des disques d'environ un mètre de diamètre est monté sur un axe.

Les disques tournent lentement et leur partie inférieure, soit 400.A ; de la superficie, baigne dans les eaux usées, la rotation de l'eau produit une aération et met le film biologique en contact avec les eaux usées. Elle favorise aussi le détachement du film biologique accumulé lorsqu'il en vient à former une couche trop épaisse. Cette accumulation est analogue à celle du floculat dans un système d'activation des boues. Tableau (II.2) (**Gerard et al. 2003**).

Tableau (II.2) : Avantages et inconvénients des méthodes de traitement biologique (El haite, 2010)

Les méthodes biologiques	Avantages	Inconvénients
Boues actives	• Emprise au sol réduite • Grande performance d'élimination de la DBO, la DCO et des MES.	• Coût d'investissement élevé; Sensibilité aux variations de charges : hydraulique et organique. • Nécessité d'un entretien la fréquent des ouvrages. (main d'œuvre qualifiée) • Coût d'exploitation (énergétique) élevé. • Faibles performances en

		matière d'élimination des agents pathogènes.
Lits bactériens	• Occupation au sol relativement faible • Bonnes performances en terme de réduction de la DBO, de la DCO et des MES • Faible consommation en énergie.	• Coût d'investissement élevé. • Ne supporte pas les variations de débit et de concentration des effluents • Nécessite un entretien fréquent des ouvrages. • Nuisances par le développement des insectes.
Disques biologiques	• Très bonne réactivité en cas de surcharges par rapport aux boues activées • Moins d'équipement, électromécanique • un seul moteur par file • Consommation électrique faible.	• Limitation de la capacité de la STEP à 100000 EH· , • Possibilité de la pollution olfactive.

7-3-2- Traitement secondaire anaérobie

La digestion anaérobie Le traitement secondaire anaérobie implique une série de réactions de digestion et de fermentation réalisées par de nombreuses espèces de Bacteria et d'Archacea en conditions anaérobies. Le traitement anoxique est typiquement employé pour traiter les eaux contenant de grandes quantités de matières organiques insolubles (et donc un fort DBO), telles que les fibres, la cellulose résultant des industries laitières et agroalimentaire.

Le processus de dégradation anoxique proprement dit se déroule dans des grands réservoirs clos appelés digesteurs ou bioréacteurs. Le procédé nécessite les activités collectives de nombreux et différents types de micro-organismes (**Madigan et Martinto, 2007**).

Grace à l'action des micro-organismes anaérobies présentes les composés macromoléculaires des eaux usées sont d'abord digérés par les polysaccharases, des protéases et des lipases pour donner des composés solubles. Ces composés solubles sont alors fermentés pour fournir un mélange d'acide gras, H₂ et de CO₂, qui sont ensuite fermentés en acétates,

CO₂ et H₂. Ces produits sont alors utilisés comme substrats par les *Archaea* méthanogènes capables de réaliser les réactions suivantes :



Ainsi les produits principaux du traitement anaérobies des eaux usées sont le CH₄ (Méthane) et le CO₂. Le méthane peut être collecté puis brûlé, ou utilisé comme combustible pour le chauffage et l'énergie de la station d'épuration (**Madigan et Martinto, 2007**).

Les avantages des procédés anaérobies (demande énergétique limitée, faible production de boues, et production de méthane valorisable) ont suscité de grandes espérances.

Les inconvénients liés aux caractéristiques de la flore anaérobie, et en particulier à son faible taux de croissance, et l'impossibilité d'éliminer l'azote, ont malheureusement limité l'application de cette technologie.

La flore anaérobie peut être utilisée, comme pour l'aérobie, en culture libre ou en culture fixée. Les traitements anaérobies nécessitent dans la plupart des cas un post-traitement aérobie pour l'élimination de l'ammoniaque et du résiduel de DBO₅ avant rejet dans l'environnement (**Grosclaude, 1999**).

7- 4- Traitement tertiaire

Enlèvement de constituants spécifiques de l'eau usée tels que les nutriments et les métaux lourds, qui ne sont pas enlevés par le traitement secondaire. Ce sont des traitements complémentaires, dénommés parfois traitements avancés (coagulation physico-chimique, filtration sur sable, chloration, ozonation, traitement par le charbon actif, etc.) (**Edline, 1996**). La désinfection, habituellement avec du chlore, est employée pour réduire les constituants microbiologiques (**FAO, 2002**). Appelés aussi les traitements complémentaires qui visent principalement l'élimination du phosphore (la déphosphatation) et les germes pathogène (la désinfection) (**Assobhei, 2009**).

7-4-1- Déphosphatation

La déphosphoration biologique consiste à provoquer l'accumulation du phosphore dans les cultures bactériennes des boues. Les mécanismes de la déphosphoration biologique sont relativement complexes, et leur rendement variable (en fonction notamment de la pollution carbonée et des nitrates présents dans les eaux usées) (**Garzón, González, 1996**). Dans les grosses installations d'épuration, ce procédé est souvent couplé à une déphosphatation physico- chimique, pour atteindre les niveaux de rejets requis (**Prescott et al, 2007**).

7-4-2- Désinfection

La désinfection vise à réduire la concentration des germes pathogènes dans les effluents avant rejet dans l'environnement. Contrairement aux normes de désinfection pour la production d'eau potable qui spécifie l'absence totale de coliformes, les normes de rejets pour les eaux résiduaires urbaines ERU varient suivant la nature du milieu récepteur. On peut distinguer deux catégories de traitement :

- Les procédés extensifs comme le lagunage.
- Les procédés physico-chimiques intensifs comme la désinfection par le chlore, l'acide péracétique, les UV (**Grosclaude, 1999**).

7-5- Traitement des boues

Les traitements biologiques ou physico-chimiques utilisés pour l'épuration des eaux résiduaires génèrent une production importante de boues diluées (> 99% d'eau) et contenant de la matière organique fermentescible. Les deux principaux objectifs de la filière de traitement des boues seront donc :

- De stabiliser les matières organiques pour éviter toute fermentation incontrôlée qui entraînerait des nuisances olfactives.
- D'éliminer un maximum d'eau afin de diminuer les volumes de boues à évacuer.

Après une étape préalable d'épaississement permettant de concentrer les boues, la stabilisation de la matière organique est réalisée grâce à des procédés biologiques ou physico chimiques.

L'étape finale de déshydratation permettra d'extraire le maximum d'eau (**Grosclaude, 1999**).

Chapitre III
Bioremédiation par des microalgue

1- Définition des bioremédiation

La bioremédiation est définie comme l'utilisation de micro-organismes pour éliminer et détoxifier efficacement les polluants grâce à leurs diverses capacités métaboliques. Les polluants environnementaux, y compris les produits rejetés par les industries pétrolières, sont efficacement éliminés par cette technologie émergente (**Medina-Bellver et al. 2005**).

Cette technique peut être utilisée pour la remédiation des métaux lourds, des métalloïdes ou d'autres polluants inorganiques du sol ou de l'eau (**Ali et al, 2013; Ashraf et al, 2019**). Il a été prouvé que cette technologie est rentable, efficace, nouvelle, écologique et solaire avec une bonne acceptation du public par rapport aux techniques d'ingénierie comme l'excavation, l'incinération du sol, le lavage des sols, le rinçage et la solidification (**Ali et al, 2013; Sarwar et al, 2017**). La biorémédiation peut être in situ ou ex situ (**Roger et Jack, 2000**). La bioremédiation in situ est l'application d'un traitement biologique pour nettoyer les composés dangereux présents dans l'environnement. (**Surajit, 2014**).

Les technologies de bioremédiation représentent aussi une approche alternative d'assainissement de l'environnement en offrant un avantage sur les coûts. il existe de nombreux organismes qui peuvent accumuler des substances toxiques dans leur biomasse à des concentrations beaucoup plus élevées que dans la matrice environnementale (**Cunningham et Berti, 1993**).

Les microalgues ont un grand potentiel et peuvent être utilisées pour le traitement de différents types d'eaux usées. La biorestauration des eaux usées à base de microalgues est très efficace, efficace, respectueuse de l'environnement et économique (**Sirakov et al.2015**).

2- Bioremédiation par les microorganismes

La nécessité de dépolluer les sites contaminés a conduit au développement de nouvelles technologies de l'environnement qui ont pour objectif de détruire les composés xénobiotiques plutôt que de les accumuler dans les décharges. La bioremédiation est une option qui offre la possibilité de détruire ou de rendre moins toxiques les polluant, en utilisant des activités biologiques naturelles. Les microorganismes sont utilisés depuis environ un siècle pour le traitement des eaux usées et des composts. Ce qui est nouveau c'est l'utilisation de ce procédé microbiologique pour nettoyer les sols, les eaux souterraines, les estuaires etc. Les systèmes sont différents en raison de la nature du polluant et du milieu où se déroule la dégradation. Les sites sont fréquemment contaminés par un mélange de composés organiques très complexes comme par exemples les huiles minérales ou les solvants industriels. A cela s'ajoutent des polluants inorganiques comme les métaux lourds (**Chedly ABDELLY, 2006**).

3- Phycoremédiation

Le terme phycoremédiation a été introduit par John (2000a) pour désigner la remédiation effectuée par les algues, et la définition a été étendue au-delà du processus en raison des fortes concentrations de minéraux trouvées dans certaines algues. La phycoremédiation a été définie comme l'assainissement des milieux aquatiques par l'utilisation d'algues comme outils, entraînant l'amélioration de la qualité de l'eau, y compris la réduction des métaux lourds, conduisant au développement durable des systèmes aquatiques. Bien que des recherches considérables soient nécessaires pour établir le mécanisme impliqué dans l'hyperaccumulation des minéraux par les algues, elles sont potentiellement un outil rentable et économe en énergie («vert») pour l'assainissement des vides de mines ou des zones humides dégradées avec des problèmes similaires. Mon objectif dans ce chapitre est de donner un bref compte rendu de l'utilisation des algues vertes comme outils dans l'élimination des métaux lourds des vides de mines acides, illustrée par deux histoires de cas : une algue verte filamenteuse - *Mougeotia* sp. d'une valorisation des eaux vides des mines de charbon, et des charophytes, dans l'amélioration de la qualité de l'eau, ainsi que l'amélioration de la biodiversité des zones humides des mines de sable (Figure (III.1)) (R. S. Ambasht & Navin K. 2003).

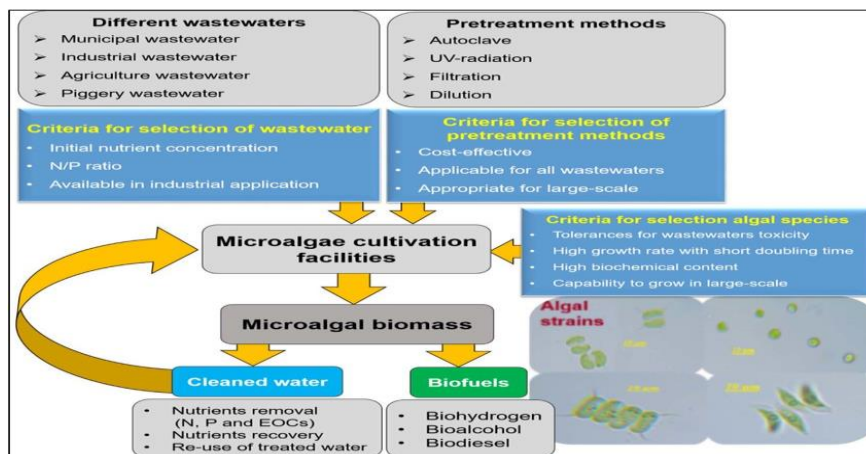


Figure (III.1) : Représentation schématique de simulations de traitement des eaux usées avec culture de biomasse de microalgues. (Salama *et al.* 2017)

Les microalgues constituent un moyen durable et économique pour le traitement des eaux usées ainsi que la production de substances commercialement de valeur. Microalgues exposition efficacité supérieure dans l'élimination des nutriments comme par rapport à un autre microorganisme parce que les nutriments aiment nitrate, ammoniac,

phosphate et d'autres oligo-éléments se trouvent dans les eaux usées c'est essentiel pour le croissance de microalgues.

Des progrès significatifs dans le domaine de la culture de microalgues accouplé avec traitement des eaux usées a abouti à l'amélioration en production de algue biomasse (**Salama et al.2017**).

4- Principe de la bioremédiation

Le procédé de la bioremédiation consiste à activer la capacité naturelle que possèdent de nombreux organismes, la plupart des temps microscopiques (bactéries, microalgues, champignons), à dégrader les polluants en composés inertes, comme l'eau et le gaz carbonique. Ces organismes peuvent être indigènes (déjà présents dans la zone polluée), ou exogènes (ajoutés au milieu), ou encore être prélevés sur le site contaminé, cultivées au laboratoire puis réintroduits dans le sol (bioaugmentation). La bioremédiation se déroule généralement en condition d'aérobie, cependant l'application de systèmes de bioremédiation en condition d'anérobie permet la dégradation d'un certain nombre de molécules récalcitrantes.

Les principales technologies utilisées dans la bioremédiation sont les suivantes :

4-1- Bioaugmentation

Cette technologie consiste à introduire des cultures de microorganismes à la surface du milieu contaminé dans l'objectif d'augmenter la biodégradation des contaminants organiques. Généralement les microorganismes sont sélectionnés sur la base de leur aptitude à dégrader les composés organiques présents dans le site à dépolluer. La culture peut comprendre une ou plusieurs espèces de microorganismes. Des éléments nutritifs sont généralement apportés dans la solution contenant les microorganismes. Cette suspension de microorganisme est apporté à la surface du sol dans les conditions naturelles ou injecte dans le site contaminé sous pression. Cette technologie est largement utilisée pour décontaminer les sites contenant des hydrocarbures : Les microorganismes choisis sont des bactéries dotées d'une grande capacité de digestion de ces hydrocarbures (**Chedly ABDELLY, 2006**).

4-2- Biofiltration

Consiste à l'utilisation d'un biofiltre pour traiter les émissions gazeuses. Le principe consiste à utiliser des microorganismes pour dégrader les polluants contenus dans l'air à traiter. la phase aqueuse (l'air contaminé) est mise en contact avec une phase aqueuse dans laquelle se développe la population microbienne, connue aussi sous le nom de la biomasse.

Dans une unité de biofiltration, l'air à épurer (à dépolluer) traverse d'abord un filtre et un humidificateur afin de supprimer les particules (poussières, graisses) présentes dans le gaz et d'amener le niveau d'humidité à 100%. L'air est ensuite introduit dans un réacteur (une cuve) contenant un garnissage formé de matériaux très poreux (très avide pour l'humidité). A la surface des particules qui constituent le garnissage se trouve un biofilm qui correspond à une pellicule d'eau contenant des microorganismes (bactéries et champignons) dont la fonction est de dégrader les polluants présents dans l'air à traiter. Cette technologie est par exemple utilisée pour traiter l'air pollué par le xylène ou par des composés azotés (**Chedly ABDELLY, 2006**).

4-3- Biostimulation

Cette technologie consiste à stimuler l'activité des populations microbiennes indigènes (présentes dans le sol ou dans les eaux souterraines) par apport de nutriments et par ajustement des conditions du milieu (potentiel d'oxydo-réduction, humidité) (**Chedly ABDELLY, 2006**).

Le compostage peut être défini comme un procédé biologique contrôlé qui assure la transformation et la valorisation des matières organiques (sous-produits de la biomasse, déchets organiques d'origine biologique) en un produit stabilisé, hygiénique, semblable à un terreau riche en composés humiques le compost. C'est la fermentation des ordures ménagères organiques (résidus alimentaires) et des déchets verts (feuillages, résidus de jardinage) afin de produire un compost réutilisable en agriculture ou dans le jardin pour fertiliser la terre. L'aération et l'humidité sont deux éléments indispensables pour entretenir les conditions d'une bonne fermentation. Le compostage peut se faire chez soi ou collectivement par des procédés industriels (**Chedly ABDELLY, 2006**).

4-4- Biolixiviation

C'est la lixiviation favorisée par la voie biologique (généralement bactérienne). Elle correspond à une méthodologie de solubilisation des métaux lourds grâce à des bactéries acidophiles fonctionnant en présence ou en l'absence d'oxygène. Deux facteurs sont importants pour la biolixiviation : la température qui doit être comprise entre 25 et 35 °C. La taille des particules qui doivent être très proches de celle des bactéries (**Chedly ABDELLY, 2006**).

5- Importance des micro-algues dans le traitement des eaux usées

Les micro-algues jouent des rôles clés dans le traitement biologique des eaux usées par lagunage (**Humenik, Hanna, 1971**).

- Les micro-algues se nourrissent essentiellement d'azote et de phosphore, contenus en grande quantité dans les eaux usées.
- Elles peuvent même contribuer directement à l'élimination de certains dérivés organiques (**Pearson et al, 1987**).
- Elles assurent l'élimination, en partie, des sels nutritifs excédentaires dans les eaux résiduaires (**Pouliot, Delanoüe, 1985**).
- Par leur activité biologique, elles influencent négativement les conditions de vie de certaines bactéries pathogènes, conduisant ainsi à leur réduction en nombre et même leur disparition (**Parhad, Rao, 1974**).
- Dégrader et transformer le complexe de xénobiotique.
- Utilisant des microalgues comme un capteur biologique pour détecter la pollution (**Dipesh Kumar et al, 2019**).

6- Avantages et inconvénients de la bioremédiation

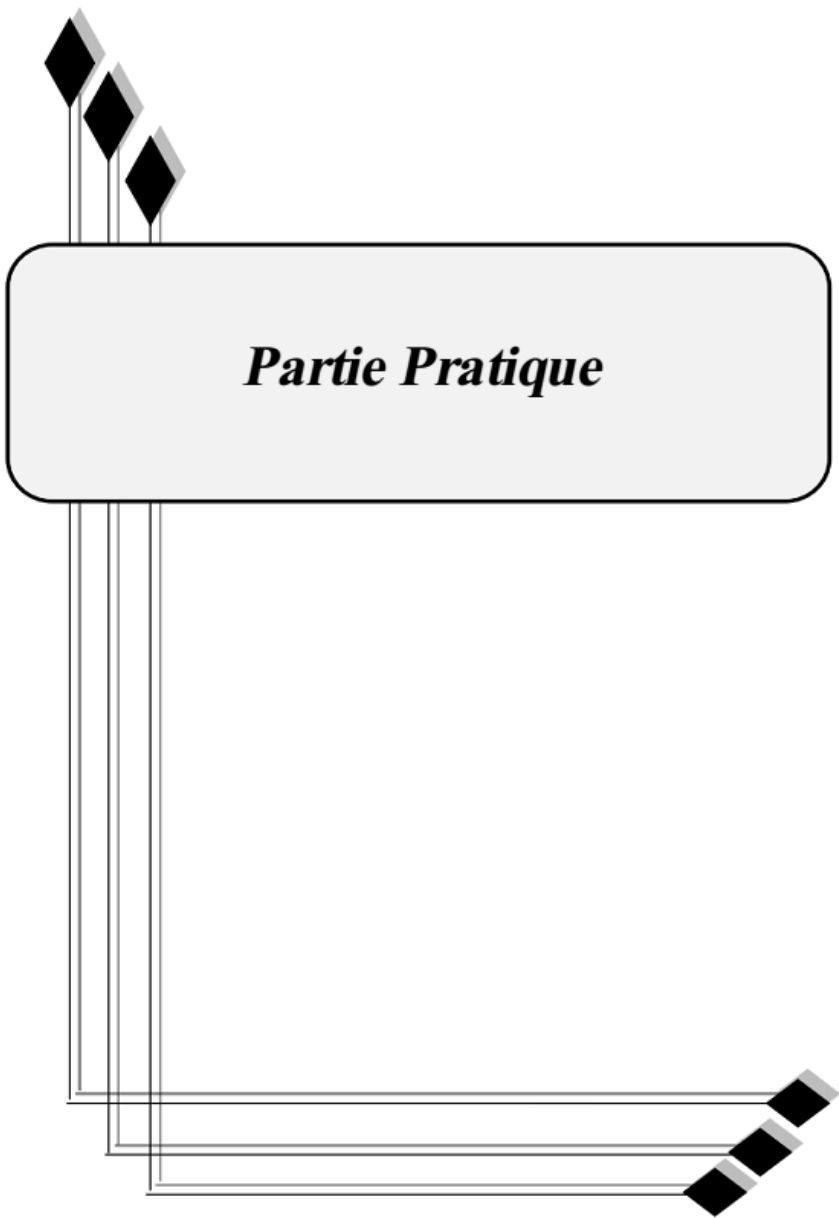
Il existe de nombreux avantages à utiliser la bioremédiation pour traiter les POPS par rapport à d'autres types d'options de traitement telles que l'excavation physique ou les traitements chimiques. Les systèmes de confinement de bioremédiation ont la capacité de transformer les contaminants des composés dangereux en composés moins toxiques. La plupart des techniques de bioremédiation ne nécessitent pas d'élimination ou de transport de milieux contaminés et sont donc moins coûteuses et plus durables que les autres options de nettoyage pour les POPS. Enfin, les techniques de bioremédiation perturbent peu l'environnement et le public. De nombreuses installations de bioremédiation ont des plantes et sont esthétiques. Il existe également des inconvénients à l'utilisation de la biorestauration, car la biorestauration est largement affectée par la biodisponibilité du polluant. De plus, pas tous les composés sont transformés par bioremédiation, de plus, certains produits de dégradation issus de la biodégradation des polluants organiques peuvent être encore plus toxiques que leur forme chimique d'origine. L'utilisation de la biorestauration est également très spécifique ; Ainsi, certains types de microorganismes et d'espèces végétales ne pourront traiter avec succès que certains POPS. La biorestauration prend également beaucoup de temps pour produire un site propre ou sûr. Enfin, il est difficile de montrer l'effet positif de la biorestauration in situ des POPS en raison des divers facteurs incontrôlables tels que

l'interaction actuelle de l'écosystème dans le site d'assainissement. Les avantages et inconvénients de la biorestauration, de l'excavation et des traitements chimiques sont résumés dans le tableau (III.1) (Nancharaiah & Vayalam 2019).

Tableau (III.1) : Les avantages et inconvénients de la biorestauration, de l'excavation et des traitements chimiques (Nancharaiah & Vayalam 2019).

	Description	avantages	inconvénients
Bioremediatin (In Situ)	Utilisation de l'activité biologique naturelle du biote et des micro-organismes pour éliminer ou dégrader les POPs dans les milieux sur place	• Pas besoin de déplacer des milieux contaminés pour le traitement • Économise de l'argent sur les coûts d'enlèvement et de transport • Esthétique • Perturbation minimale du public et de l'environnement • Fournir des habitats pour la faune	• Largement affectée par la biodisponibilité des POP La biodégradation peut provoquer un produit plus toxique que le POP original. Très spécifique; Tous les composés ne peuvent pas être traités par biorestauration • Les espèces de microbes végétaux utilisées doivent pouvoir survivre dans l'environnement toxique • Prend du temps • Facteurs incontrôlables sur le site
Excavation	Enlever, généralement en creusant avec de la machinerie lourde. milieu contaminé du site utilisant	• Entraîne généralement une élimination complète des contaminants du site • Solution rapide et simple	• Dérangement pour le public et l'environnement • Coûteux pour enlever les médias et le transport • Utilisation de machinerie lourde • Médias excavés encore contaminés. Traitement supplémentaire nécessaire

Traitement chimique (In Situ)	Utilisation de produits chimiques spécialisés comme agents de réduction ou d'oxydation pour éliminer les POPs	• Pas besoin de déplacer des milieux contaminés pour le traitement • Économisez de l'argent sur les coûts de transport de l'âme contaminée	• Tous les composés ne peuvent pas être traités avec des produits chimiques • Certains produits chimiques utilisés pour le traitement peuvent être nocifs pour l'homme et l'environnement. • Facteurs incontrôlables sur le site • Il peut être nécessaire de restreindre l'accès à la zone pendant le traitement • Risque de sous-produit chimique
---	--	---	---



Chapitre IV
Présentation de la zone D'étude

Dans la wilaya d'El oued, il existe quatre stations d'épuration par lagunage aéré (STEP 01, STEP 02, STEP 03, STEP 04) ont été réalisées par la société allemande Dywidag pour le compte de l'ONA. Ces stations ont été raccordées à un réseau, Parmi ces dernières, la station de Hassani Abdelkrim qui a été dimensionnée pour desservir les communautés de : Debila, Hassani Abdelkrim, Guemmar et Teghzout. La station d'épuration de HASSANI ABDELKRIM est de type lagunage aéré.

La population totale de ces communiâtes actuellement d'environ 139772 habitants. La pleine capacité de la station d'épuration sera atteinte en 2030. Elle est limitée :

- Au Nord est par Sidi Aoun.
- Au Nord-Ouest par Guemar.
- A l'Ouest par Taghzout.
- Au sud - ouest par Kouinine.
- Au sud par la Wilaya d'El Oued.
- Au sud- Est et Est par Trifaoui.

Le processus de traitement des eaux usées se base sur des lagunes aérées, et comprend les étapes principales ci-après :

- Prétraitement avec dégrilleur et dessableur longitudinal.
- Bassin d'activation primaire (étape 1 avec 3 lagunes aérées parallèles).
- Bassin d'activation secondaire (étape 2 avec 3 lagunes aérées parallèles).
- Lagune de traitement de finition (3 lagunes de post-traitement parallèles).
- Traitement des boues (10 lits de séchage des boues).

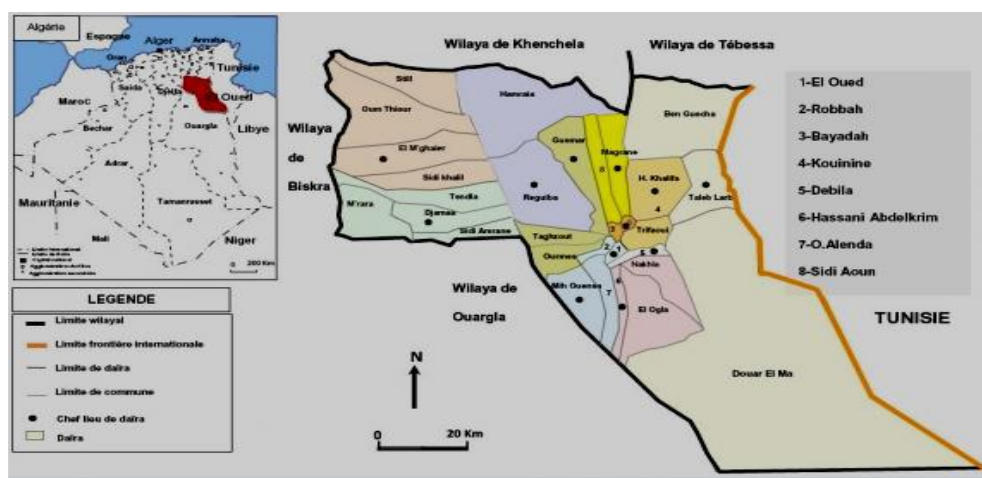


Figure (IV.1) : Localisation de la commune dans la wilaya d'El Oued (Google maps, 2021).

1- Station d'épuration des eaux usées urbaines (STEP2)

La station d'épuration des eaux usées n° 2 à Oued Souf est celle de type lagunage aéré. Qui est composée de six lagunes aérées réparties en deux étages de traitement et de trois lagunes de finition (3ème étage), d'un ouvrage de prétraitement (Dégrillage, dessablage), de 10 lits de séchage des boues d'épuration et de bâtiments d'exploitation, ainsi que des équipements hydromécaniques et électriques montés Figure (IV.2) .

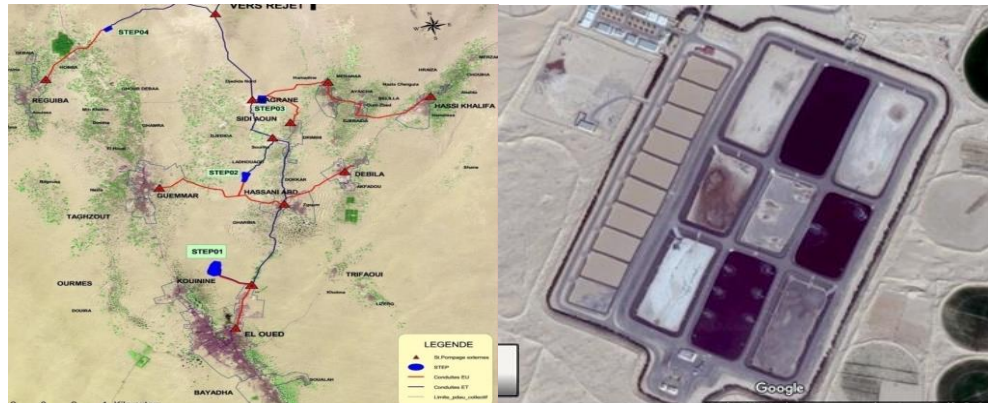


Figure (IV.2) : Localisation de la station d'épuration (Google maps, 2021).

2- Description générale de la station



Figure (IV.3) : Stations de lagunage aéré de Hassani Abdelkrim (ONA, 2021).

- 1- Regard de dégazage
- 2- Dégrillage
- 3- Comptage des eaux brutes (type venturi)
- 4- Dessablage
- 5- Première étage (3 Bassins d'aération A1, A2, A3), (24 aérateurs de surface) Volume de bassins : 28574 m³, longueur : 142 m, largeur : 66 m, profondeur : 3.6 m.

6-Deuxième étage (3 Bassins d'aération B1, B2, B3), (09 aérateurs de surface) Volume de bassins : 19091 m³, longueur : 115 m, largeur : 66 m, profondeur : 2.9 m.

7- Bassin de finition (3 Bassins F1, F2, F3) Volume de bassins : 14272 m³, longueur : 154 m, largeur : 66 m, profondeur : 1.5 m

8- Filière boues : [Déshydratation naturelle (10 lits de séchage)]

Tableau (IV.1) : Données générales de la station (ONA, 2021)

Nom de la station de lagunage	STEP 02 Hassani abdelKrim
Commune	Hassani abdelKrim
Wilaya	El Oued
Localités concernées par le traitement	Commune de Guemmar, commune de Taghzout, commune de Hassani abdelKrim et commune de Debila
Superficie de l'assiette	18 hectares
Milieu récepteur	Chott Haloufa
Procédé de traitement	Lagunage aéré
Capacité de la station	79 620 EQH /14 332 m ³ /j
Nature des eaux brutes	Domestique
Alimentation en eau usée	Pompage
Impact de réalisation de la station	Protection de la nappe
Groupement de réalisation - Génie civil - Equipements	- TEIXEIRA DUARTE (Portugale) - Efacec (Portugale)
Date de mise en service de la station	2011

3- Objectif de traitement de la station

- Supprimer les nuisances et les risques actuels de contamination au niveau des zones urbanisées.
- Protéger l'environnement.
- Protéger la santé publique.
- Supprimer les risques de remontée des eaux en diminuant le niveau de la nappe phréatique.

4- Principe de traitement

La station d'épuration de Hassani Abdelkrim se compose de l'alignement de traitement biologique suivante :

- Arrivée des eaux brutes.
- Dégrillage des eaux brutes.
- Dessablage- déshuilage.
- Aération des eaux et formation des boues activées.
- Clarification des eaux (décantation secondaire).
- Désinfection des eaux traitées.
- Recirculation des boues.
- Evacuation des boues fraîches vers les lits de séchage.
- Déshydratation des boues sur les lits de séchage.
- Rejet des eaux traitées vers CHOTT HALLOFA (rejet final).

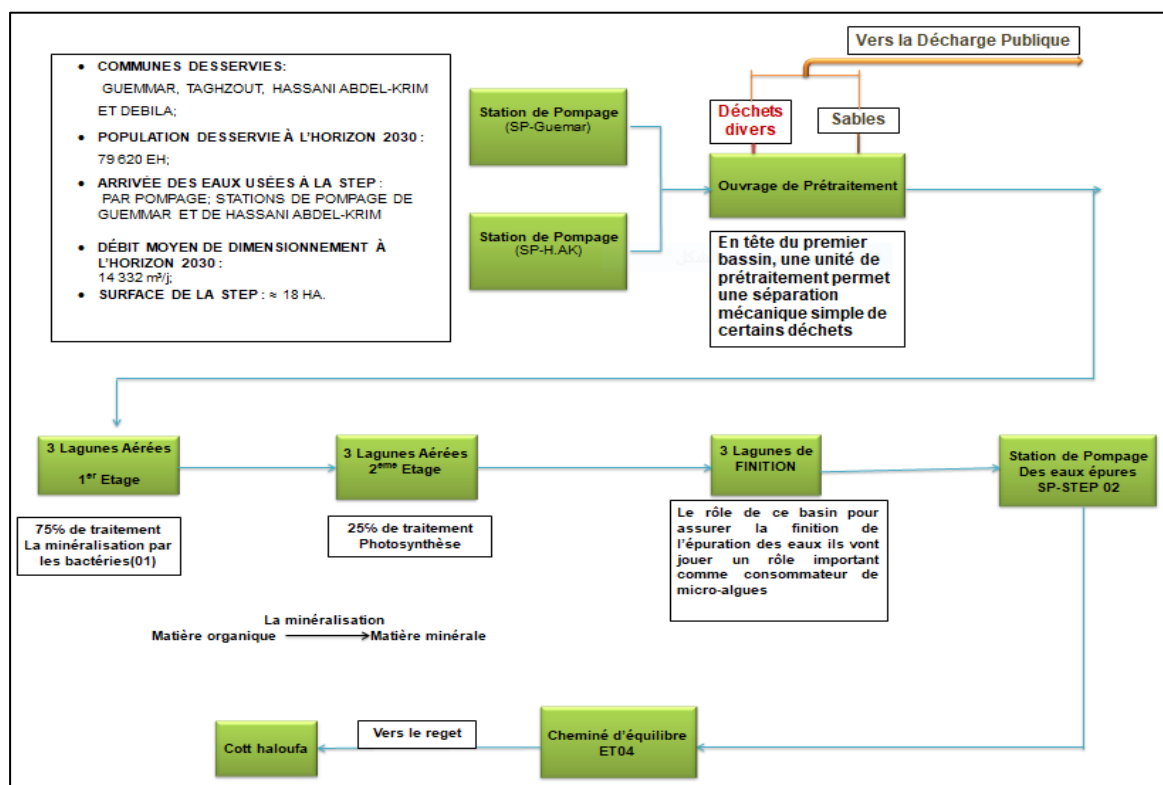


Figure (IV.4) : Un résumé le travail de la station STEP2 de HASSANI AbdelKrim (Photo originale, 2021).

✓ Arrivée des eaux brutes

Les eaux brutes sont acheminées vers les ouvrages de la station par deux postes de pompage Sp1 en Guemar et Sp2 en Hassani Abdelkrim.

a. Prétraitement

- **Dégrillage** Construit en béton, avec deux chambres et dégrillage grossier dans le courant principal de l'eau usée ainsi qu'une chambre pour le by-pass de secours lors des pannes du dégrillage.

Les eaux usées travers d'une grille dont les barreaux, plus ou moins espacés, espacement entre barreaux 15 mm retiennent les éléments le plus grossiers, après les grilles nettoyer par un système à racleur motorisé dont l'action automatisée est déclenchée par un capteur de niveau spécialement conçu qui surveille en permanence la différence entre le niveau d'eau en amont et en aval sur la grille, une fois que les débris ont été recueillis et soulevés par le racleur, ils sont chargés dans une cuve horizontale, au moyen d'un transporteur à vis horizontal et sans arbre, ces débris sont ensuite déposés dans un conteneur à débris (Figure IV.5).



Figure (IV.5) : Dégrillage (station de Hassani Abdelkrim) (Photo originale, 2021).

- **Dessablage** Construit en béton, avec trois chambres. Dans cette zone, le sable contenu dans les eaux usées est décanté grâce à une réduction de la vitesse d'écoulement et grâce à la force gravitaire. Ces particules sont ensuite aspirées par un racleur avec moteur électrique et des pompes d'aspiration avec suspension flexible (pompes à moteur submersibles), le mélange sable eau s'écoule par les conduites en acier du pont racleur vers le conduit en acier, monté sur la paroi extérieure du dessablage et puis vers la classification à sable pour la déshydratation (Figure IV.6).



Figure (IV.6) : Dessablage (station de Hassani Abdelkrim) (Photo originale, 2021).

➤ **Mesure du niveau d'eau et échantillonneur**

- **Débit mètre** pour une mesure continue du débit de l'eau usée d'entrée, le système de mesure comprend un canal du type venturi et un transmetteur du niveau à ultrasons est installé derrière le dessableur longitudinal.
- **Préleveur** à proximité directe du canal venturi, un échantillonneur fonctionnant manuelle pour l'échantillonnage ponctuelle et automatiquement proportionnellement à la quantité et à temps intégré, ce dispositif assure dans une période de 24 heures un mélange de jour représentatif pour l'entrée de la station de lagunage, on a autre préleveur à la sortie.

b- Traitement secondaire des eaux usées

A la suite de ces prétraitements, les eaux à traiter subissent un traitement par le système de lagunage aéré. Cette étape est constituée de deux étages d'aération et d'un étage de finition.

✓ **Lagunes d'aération (première étape)**

Suite à l'alignement des vannes des conduites du répartiteur, l'eau usée à traiter biologiquement s'écoule par les conduites et répartie de manière homogène. Le traitement biologique d'eau consiste des trois lagunes aérées (A1, A2, A3) de la même taille et conception. Pour assurer une réduction efficace de la pollution biologique (DBO) et chimique (DCO). A l'intervention des micro-organismes et l'oxygénation que fournir par 8 aérateurs dans chaque lagune, pour attendre dégradation de pollution organique entre 75 %. Selon le $\text{Eau} + \text{pollution organique} + \text{micro-organismes} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{biomasse}$ (Figure IV.7) (ONA, 2021).



Figure (IV.7) : Lagune aérée (station de Hassani Abdelkrim) (Photo originale, 2021).

✓ **Lagunes d'aération (deuxième étape)**

Le fonctionnement de la deuxième étape d'aération est identique à la première. Mais pour la dégradation de la charge restante d'environ 25% assuré par 3 pièces d'aérateurs ont été installées dans chaque lagune (Figure IV.8) .



Figure (IV.8): Aérateur (station de Hassani Abdelkrim) (Photo originale, 2021).

✓ **Traitement complémentaire (lagune de finition)**

Les lagunes de finition ont été conçues et construites selon le même système que les lagunes aérées 1 et 2.

Les lagunes de finition ou de traitement final, ont été construites pour améliorer la qualité de l'eau usée traitée biologiquement, en majeure partie des matières dégradables est retenue dans les lagunes de l'étape 1 et 2. Voilà pourquoi le dépôt des boues dans les lagunes de traitement de finition augmente juste lentement. Les écarts de temps jusqu'au raclage des boues peuvent ainsi être prolongés par rapport aux lagunes aérées. Selon une estimation approximative, on peut assurer une fréquence de raclage de 8-10 ans. L'eau usée clarifiée biologiquement est dirigée vers l'émissaire (Figure IV.9).



Figure (IV.9) : Lagune de finition (station de Hassani Abdelkrim) (**Photo originale, 2021**).

✓ **Lits de séchage des boues**

Les boues épaisses sont épandues sur 10 lits de séchage (Fig.10) pour y être déshydratées naturellement. Les lits sont formés d'aires délimitées par des murettes en béton armé et d'une couche de sable disposée sur une couche support de gravier. Des conduites de drainage disposées sous la couche support recueillent les eaux d'égouttage (Figure IV.10) .



Figure (IV.10) : Lits de séchage (station de Hassani Abdelkrim). (**ONA, 2021**).

Chapitre V
Matériel et méthodes

Dans ce chapitre, nous étudierons le bioremédiation de polluant organique par les micro algue *Arthrospira platensis*.

1- Matériel d'étude

1-1- Matériel biologique

La souche de la Spiruline utilisée dans notre travail est *Arthrospira platensis* a été isolée de la fourrière (23°06' 11", N5° 49' 01" E) dans la région de Tamanrasset (Algérie). Les échantillons d'eau prélevés ont été traités selon les protocoles microbiologiques standards (Stanier, 1971 ; Rippka, 1979), puis la souche purifiée a été identifiée selon les clés et la description établies par Komèrak et al. (Komárek,1998).



Figure (V.1) : La souche de spiruline *Arthrospira platensis* (Photo originale, 2021).

1-2- Matériel non biologique

Tableau (V.1) : matériel non biologique

Matériels non biologique utilisée		Reactive utilisée
Appareil utilisée	Instrument	
- Conductimètre (Sens ion5) - pH mètre - Oxymétrie(LDO HQ 30d) - Spectrophotomètre - Rampe de filtration - Balance électrique - Thermo-réacteur	- Verrerie - Micropipette à différente volume - Barrou-magnétique - Béchers - Pipette de Pasteur - Eprouvette de réaction	- Eau distillé - LCK 338(azote totale) - LCK 342(nitrite) - LCK 339(nitrate) - Solution étalons 4, 7,10. - Solution étalons NaCl.

- Agitateur	sèche	
- thermomètre	- spatule	
- Réfrigérateur conservant	- lame et lamelle	
- autoclave	- Résistance aquarium	
- Microscope optique	- Lampe	
	- Pompe air aquarium	
	- flacons en verre stériles des 2l et 250ml	
	- entonnoir	
	- Lunette de protection	
	- Gants.	

2- méthodes

2-1- Suivi de croissance d'*Arthrospira platensis*

2-1-1- préparation des milieux des cultures (milieu de Zarrouk)

Le milieu de culture retenu est celui de milieu de Zarrouk. Le choix de ce milieu est effectué de fait que ce milieu est le plus convenable pour la culture de la Spiruline.. est fabriqué à partir d'eau distillée et contient, en g/litre. Les constituants des milieux de culture sont cités dans le Tableau (V.2).

Tableau (V.2) : Composition chimique du milieu de culture (milieu de Zarrouk).

Elément	Quantité g /l	Quantité g/20l
NaHCO ₃	16,8	336
K ₂ HPO ₄	0,5	10
NaNO ₃	2 ,5	50
K ₂ SO ₄	1	20
Na Cl	1	20
MgSO ₄ , 7 H ₂ O	0,2	4
CaCl ₂	0,04	0,8
FeSO ₄ , 7 H ₂ O	0,01	0,2
EDTA	0,08	1,6

solution A5 :	1	20
H ₃ BO ₃	2,86	57,2
MnCl ₂ , 4 H ₂ O	1,81	36,2
ZnSO ₄ , 7 H ₂ O	0,222	4,44
CuSO ₄ , 5 H ₂ O	0,079	15,8
MoO ₃	0,015	0,3

➤ Méthode des préparations

Pour la préparation 1 litre de milieu de cultures de zarrouk ont:

- Nous pesons la quantité de chaque élément séparément jusqu'à ce que nous obtenions la quantité requise, puis on la verse dans une bouteille en verre de 250 ml à travers un entonnoir avec une quantité d'eau distillée puis on mélange la bouteille.
- Après avoir terminé le processus de pesage des éléments, nous collectons 5 composants (H₃BO₃ ; MnCl₂, 4 H₂O ; ZnSO₄, 7 H₂O ; CuSO₄, 5 H₂O ; MoO₃) dans un bécher puis on mélange par l'agitateur magnétique pour obtenue la solution A5.
- Nous collectons également les 9 composants restants (NaHCO₃ ; K₂HPO₄ ; NaNO₃ K₂SO₄; Na Cl ; MgSO₄, 7 H₂O ; CaCl₂ ; FeSO₄, 7 H₂O ; EDTA) dans un bécher puis on mélange par l'agitateur magnétique , puis on ajoute 1ml de solution A5, puis on prend ce mélange et on le met dans un flacon de 1 L, et on ajoute de l'eau distillée jusqu'à ce que le mélange atteigne 1 L pour obtenir un milieu de culture.
- On verse le milieu de culture dans une bouteille en verre, on la ferme, puis on la met à l'autoclave pendant 20 minutes, puis on la met au réfrigérateur jusqu'à utilisation.





Figure (V.2) : étape de préparation des milieux de culture (Photo originale, 2021).

- **Remarque :** Dans cette expérimentale nous avons préparé volume 20l des milieux de culture.

2-1-2- Suivi de croissance de spiruline

2-1-2-1- Mesure du Température

La température est déterminée par Thermomètre.

Méthode d'analyse

- On rince bien thermomètre avant chaque usage avec l'eau distillée ; On Plonge thermomètre dans la culture de spiruline ; On lit la température ; On rince bien thermomètre après chaque usage avec l'eau distillée.

2-1-2-2- Mesure du pH

Détermination de l'acidité, la neutralité ou la basicité de la culture de spiruline.

➤ Méthode d'analyse

Pendre environ = 40 ml de culture de spiruline à analyser ; Allumer le pH mètre ; Rincer l'électrode avec de l'eau distillée ; Tremper l'électrode de pile dans la solution tampon ; Laisser stabiliser un moment jusqu'à affichage du standard ; Enlever l'électrode et la rincer abondamment avec l'eau distillée.

2-1-2-3- Mesure du Biomasse

- On a mesuré l'absorbance pour avoir une estimation de la concentration de la biomasse.
- On fait le blanc (milieu de culture sans spiruline) à longueur d'onde 625 nm dans le spectrophotomètre UV-VIS, puis on fait 3 ml de culture de spiruline à la même longueur d'onde.



Figure (V.3) : spectrophotomètre (Photo originale, 2021).

2-1-2-4- Mesure du Conductivité

La conductivité électrique mesurée par la conductimètre pour déterminer la conductivité, stabilité et TDS de culture de spiruline.

➤ Méthode d'analyse

On Plonge l'électrode dans la solution à analyser. On lit la conductivité, dès stabilité, TDS de celle-ci. On rince bien l'électrode après chaque usage avec l'eau distillée. La valeur est lire directement sur l'écran de l'appareil en milli-siemens par centimètre ($\mu\text{S}/\text{cm}$).

2-1-2-5- Mesure de l'Ammoniac

➤ Mode opératoire

- ✓ Ouverture le tube de réactif et ajouter 0.2 ml de échantillon puis agiter le tube.
- ✓ Laisser le tube repose pendant 15 minutes.
- ✓ Mettre le tube en spectrophotomètre, le résultat est donné directement en mg/l.

2-1-2-6- Mesure du Nitrite (NO_2^-)

➤ Mode opératoire

- ✓ Ouvrez le couvercle du couvercle du tube de réactif.
- ✓ Ouvrez le couvercle du de réactif.
- ✓ Ajouter 2 ml de l'échantillon.
- ✓ Tournez le couvercle et fermer le tube de réactif.
- ✓ Bien mélanger le tube de réactif.
- ✓ Laisser reposer pendant 10 minutes.
- ✓ En mettez tube de réactif dans le Spectrophotomètre HACK et lire le résultat. Les résultats sont donnés directement en mg/l .

2-1-2-7- Mesure du Nitrate (NO_3^+)

➤ Mode opératoire

- ✓ Pipeter lentement dans la cuve 1.0 ml d'échantillon.

- ✓ Pipeter lentement 0.2 mL de la solution LCK 339 A.
- ✓ Fermer la cuve et mélanger le contenu en la retournant plusieurs fois jusqu'à ce que le mélange soit complet.
- ✓ Attendre 15 min, bien nettoyer l'extérieur de la cuve et mesurer.

2-1-2-8- Mesure de L'azote Total (NT)

➤ Mode opératoire

- ✓ Doser dans une éprouvette de réaction sèche.
- ✓ 0.2 ml d'échantillon, 2.3ml de solution A (LCK 338 A), 1 tablette B (LCK 138/238/338B), fermer immédiatement. Ne pas mélanger.
- ✓ Chauffer directement à Thermo réacteur 60 mn à 100° C.
- ✓ HT 15 mn.
- ✓ Refroidir et ajouter 1 MicroCap C (LCK 138/238/338 C).
- ✓ Fermer l'éprouvette de réaction et mélanger jusqu'à ce que le lyophilisat se soit complètement dissous du MicroCap C (aucune particule restante).
- ✓ Pipetter lentement dans le test en cuve 0.5 ml d'échantillon désagrégé.
- ✓ Pipetter lentement 0.2 ml de solution D (LCK 138/238/338 D), fermer immédiatement la cuve et mélanger le contenu jusqu'à qu'aucun dépôt ou agrégat ne soit observable.
- ✓ Attendre 15 min, bien nettoyer l'extérieur de la cuve et mesurer.

2-2- Bioremédiation par de *Arthrospira platensis*

2-2-1- Analyse des eaux polluant et des eaux traitée

2-2-1-1- Mesure du Conductivité

La conductivité électrique mesurée par la conductimètre pour déterminer la conductivité, salinité, TDS de l'eau.

➤ Méthodes d'analyse

On Plonge l'électrode dans la solution à analyser. On lit la conductivité, dès stabilité, TDS de celle-ci. On rince bien l'électrode après chaque usage avec l'eau distillée. La valeur est lire directement sur l'écran de l'appareil en milli-siemens par centimètre ($\mu\text{S}/\text{cm}$).



Figure (V.4) : Conductimètre (Sens ion5) (Photo originale, 2021).

2-2-1-2- Mesure du PH

Détermine l'acidité, neutralité, ou la basicité de l'eau.

➤ Mode Opérateur

Pendre environ = 100 ml d'eau à analyser ; Allumer le pH mètre ; Rincer l'électrode avec de l'eau distillée ; Tremper l'électrode de pile dans la solution tampon pH=7 ; Laisser stabiliser un moment jusqu'à affichage du standard ; Enlever l'électrode et la rincer abondamment avec l'eau distillée ; Etalonner dans la même manière avec les solutions tampon pH =10 ou pH = 4. La valeur est lue directement sur l'écran de l'appareil.



Figure (V.5) : PH mètre (Sens ion 1) (Photo originale, 2021).

2-2-1-3- Mesure du Température

La température est déterminée en même temps que la mesure l'oxygène dissous par l'oxymétrie.

➤ Mode opératoire

Allumer l'oxymétrie ; Rincer l'électrode avec de l'eau distillée ; Prendre environ 100 ml d'eau à analyser ; Tremper l'électrode dans le bécher ; Laisser stabiliser un moment ; Lire la concentration de l'oxygène dissous et température ; Rincer bien l'électrode après chaque usage avec l'eau distillée. Le résultat est donné directement en mg/l.



Figure (V.6) : Oxygèmetres (LDO HQ 30d) (Photo originale, 2021).

2-2-1-4- Mesure de L'azote Total (NT)

Quantité totale d'azote (en N mg/L) correspondant à l'azote organique (Norg) et ammoniacal (ion ammonium, NH_4^+) et aux formes minérales oxydées de l'azote nitrates (NO_3^-) et nitrites (NO_2^-) (Graini, 2011). Les formes réduites d'azote (organiques et ammoniacal) est appelé l'azote Kjeldahl (NTK) (Mizi, 2006 ; Koller, 2004).

A- Objectif

Détermination de la teneur en Azote Total d'une eau brute ou traitée.

B- Mode opératoire

Dans un tube à essai mis 0.2 ml d'échantillon avec 2.3 ml de solution A et une capsule de B ; Laisser reposer pendant 15 min, puis le mettre dans le thermo-réacteur à 100°C pendant 1heure; En sortez le tube à essai de la machine, puis le laisser refroidir le tube à la température ambiante dans le support d'éprouvettes et puis en ajoute 1 capsule C dans le tube d'essai; Bien mélanger le tube à essai; Prenez 0.5 ml de la mélange et de les mettre dans le tube de réactif; Ajouter 0.2 ml de la solution D; Bien mélanger le tube de réactif; Laisser reposer pendant 15 minutes ; En mettez tube à essai dans le Spectrophotomètre HACK et lire le résultat. Expression des résultants. Les résultats sont donnés directement en mg/l.



Figure (V.7): Etapes de mesure l'azote totale (Photo originale, 2021).

2-2-1-5- Mesure d'Ammoniac**➤ Mode opératoire**

Pour l'échantillons d'eau brute, utilisée le boit de réactif de 302 en gamme (47-130 mg/l; 60-167 mg/l)

- Ouverture le tube de réactif et ajouter 0.2 ml de l'eau brute puis agiter le tube; Laisser le tube repose pendant 15 minutes; Mettre le tube en spectrophotomètre, le résultat est donné directement en mg/l.

Pour l'échantillons d'eau épurée, utilisée le boit de réactif de 303 en gamme (2-47 mg/l; 2,5-60 mg/l)

- Ouverture le tube de réactif et ajouter 0.2 ml de l'eau épurée puis agiter le tube; Laisser le tube repose pendant 15 minutes; Mettre le tube en spectrophotomètre, le résultat est donné directement en mg/l.

2-2-1-6- Mesure de Nitrite

- Considéré comme un élément toxique, le NO_2^- est la forme la moins stable dans le cycle de l'azote. Il est issu de la réduction de l'ammonium NH_4^+ . Son origine est liée à l'agriculture et aux rejets urbains et industriels (Aouissi & Houhamdi, 2009).

➤ Mode opératoire

Pour les échantillons d'eau brute, utilisée le boit de réactif de 341 en gamme (0,015-0,6 mg/l; 0,05-2 mg/l)

- Ouverture le tube de réactif et ajouter 2 ml de l'eau brute puis agiter le tube; Laisser le tube repose pendant 15 minutes; Mettre le tube en spectrophotomètre, le résultat est donné directement en mg/l.

Pour les échantillons d'eau épurée, utilisée le boit de réactif de 342 en gamme (2-47 mg/l; 2,5-60 mg/l)

- Ouverture le tube de réactif et ajouter 0.2 ml de l'eau épurée puis agiter le tube; Laisser le tube repose pendant 15 minutes; Mettre le tube en spectrophotomètre, le résultat est donné directement en mg/l.



Figure (V.8) : système de tests en cuve LCK 342(Site d'internet N°02).

2-2-1-7- Mesure de Nitrate

Les nitrates sont présents dans l'eau par lessivage des produits azotés dans le sol, par décomposition des matières organiques ou des engrais de synthèse ou naturels (**Belghiti et al, 2013**).

Mode opératoire

- Prélever 1 ml à l'aide d'une pipette d'échantillons (eau brute et eau usée);
- Ajouter 0,2 ml de réactif A (le boit de réactif LCK 339 en gamme (0,23-13,50 mg/l; 1-60 mg/l) dans chaque tube puis agiter les tubes;
- Laisser les tubes reposent pendant 15 minutes;
- Mettre les tubes en spectrophotomètre, le résultat est donné directement en mg/l.



Figure (V.9) : système de tests en cuve LCK 339(Site d'internet N°01).

2-2-2- Suivi de bioremédiation de polluant organique par *Arthrospira platensis*

Nous avons préparé du milieu ordinaire qui contient de eau d'entre stérilisée + 8g de bicarbonate de sodium puis nous avons ajouté 350g/l de la souche de *Arthrospira platensis* . Les analyses suivantes (PH ; T ; Conductivité ; NO₃ ; NO₂ ; NH₃) ont été mesurées de la même manière qu'en titre (2.2.1. analyse des eaux polluent et des eaux traitée).

Chapitre IV
Résultats et discussion

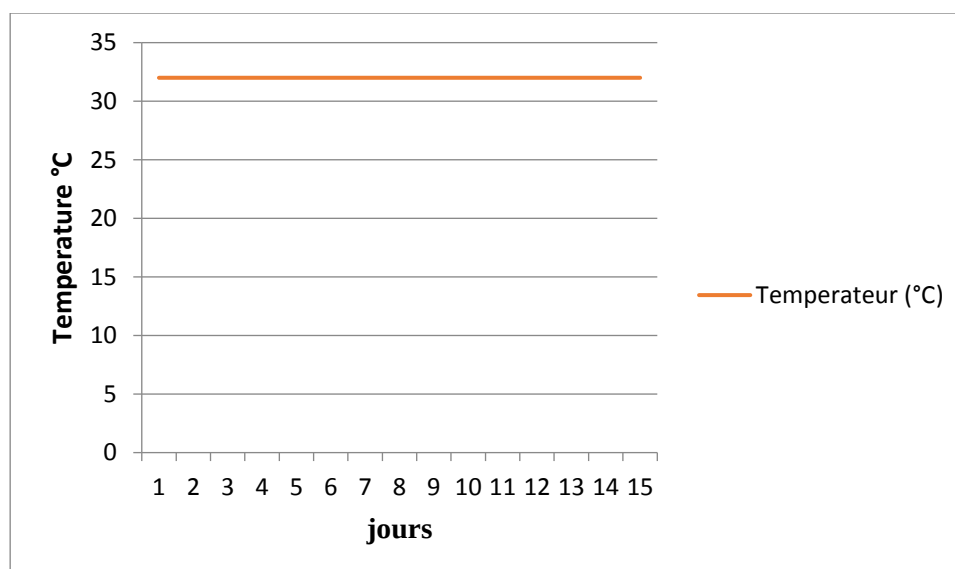
Tableau (IV.1):

1- Suivi de croissance d'*Arthrospira platensis* dans le Milieu Zarrouk

	1	3	5	7	9	11	13	15
T	32	32	32	32	32	32	32	32
pH	8.5	8.7	9	9.2	9.5	9.7	10.1	10.5
Biomasse (mg/l)	350	420	550	680	900	1350	1120	1050
Conductivité (ms/cm)	20.3	20.1	20	19.8	19.6	19.2	18.9	18.6
NH3 (mg/l)	0	0	0	0	0	0	0	0
NO2 (mg/l)	0	0	0	0	0	0	0	0
NO3 (mg/l)	412.5	403	380.6	316.3	274.5	180.9	166.5	158
NT (mg/l)	412.5	403	380.6	316.3	274.5	180.9	166.5	158

1-1- Evolution des paramètres physico-chimiques**1-1-1- Température**

D'après les résultats de la température mesurée au niveau d'aquarium on observe une stabilité de valeur température (32 °C), cette stabilité est due à la présence de thermorégulateur.

**Figure (IV.1) : Evolution de la Température dans le milieu de culture.**

FERHAT Wafa et LAKEHAL Sara a servi culture et production de la spiruline *Arthrospira platensis* dans la région d'El 'Oued nous avons trouvé le résultat inférieur.

1-1-2-PH

D'après les résultats du pH mesuré au niveau d'aquarium on observe une évolution du pH pendant les 15 jours, (**Figure IV.2**) .

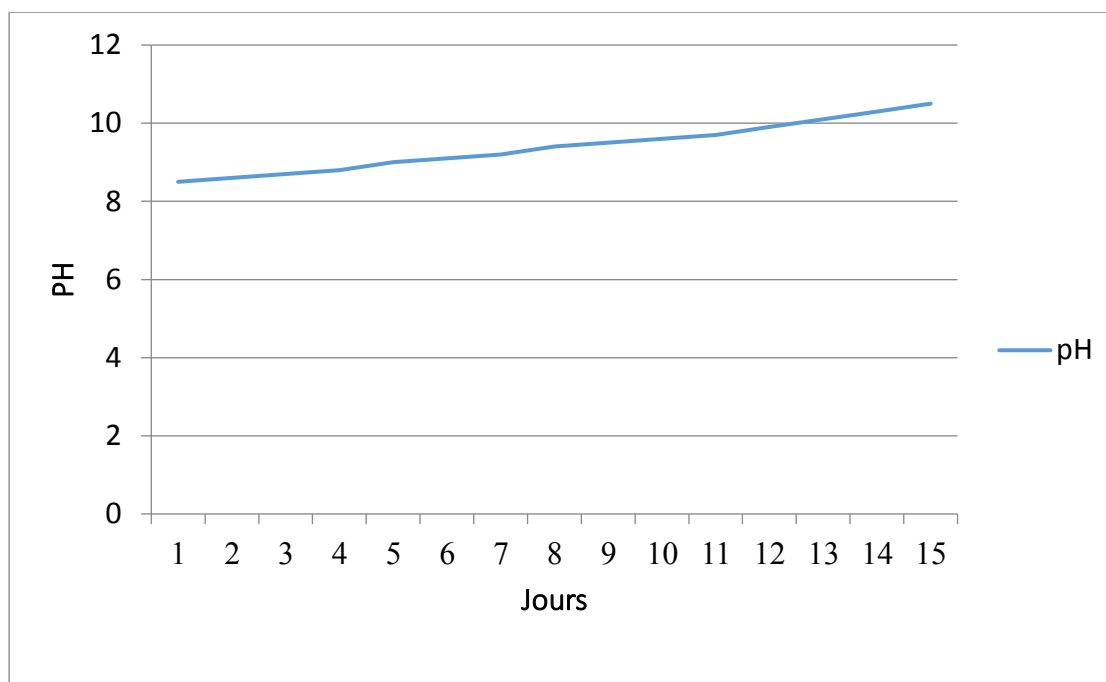


Figure (IV.2): Evolution du pH dans le milieu de culture de la spiruline.

On observe quelques augmentations de valeur de pH de 8,5 le premier jour jusqu'à ce qu'il atteigne 10,5 dans le 15 jour.

L'augmentation du pH est due à la présence de bicarbonate de sodium dans milieu de culture, la spiruline pour la photosynthèse est besoins de CO₂, elle arrive à l'air ou à la bicarbonate de sodium. la bicarbonate de sodium est transfère a la CO₂ liquide+ sodium, le CO₂ liquide aquee dans l'eau et absorbe par la spiruline et le sodium augmente le valeur de OH⁻, et ce dernier due l'augmentation de pH.

Plus le processus de photosynthèse augmente, plus le CO₂ est absorbe, plus le pH est élevé.

FERHAT Wafa et LAKEHAL Sara a servi culture et production de la spiruline *Arthrospira platensis* dans la région d'El 'Oued nous avons trouvé leurs résultat sont presque constants mais pour nous les valeurs augmente.

1-1-3-Biomasse (mg/l)

D'après les résultats de la biomasse mesurée au niveau d'aquarium on observe une augmentation de la biomasse de premier jour 350mg/l jusqu'au 1350mg/l dans 11 jours et puis une diminution jusqu'à ce que vous atteigniez 1050mg/l dans 15 jours (Figure N° 21).

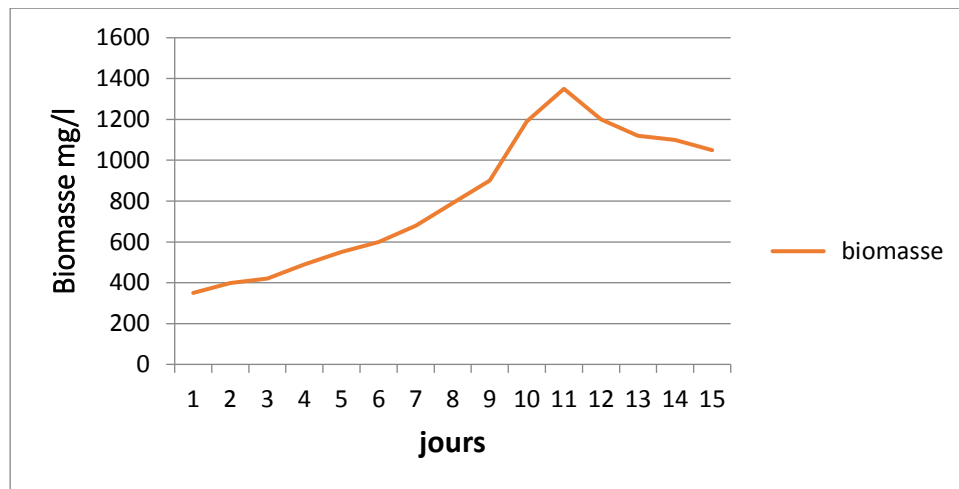


Figure (IV.3) : Evolution de la biomasse dans le milieu de culture de la spiruline.

L'augmentation de la biomasse est due de fournir toutes les conditions appropriées de la croissance (pH, Température, nutriment, lumière...).et la diminution due à la diminution une ou plusieurs condition de croissance

FERHAT Wafa et LAKEHAL Sara a servi culture et production de la spiruline *Arthrospira platensis* dans la région d'El 'Oued nous avons trouvé le même résultat (augmentation de la biomasse).

1-1-4- Conductivité électrique (CE)

D'après les résultats de la CE mesurée au niveau d'aquarium on observe une diminution de la CE de 20,3 ms/cm le premier jour jusqu'à ce qu'il atteigne 18,6 ms/cm dans le 15 jour (Figure IV.4).

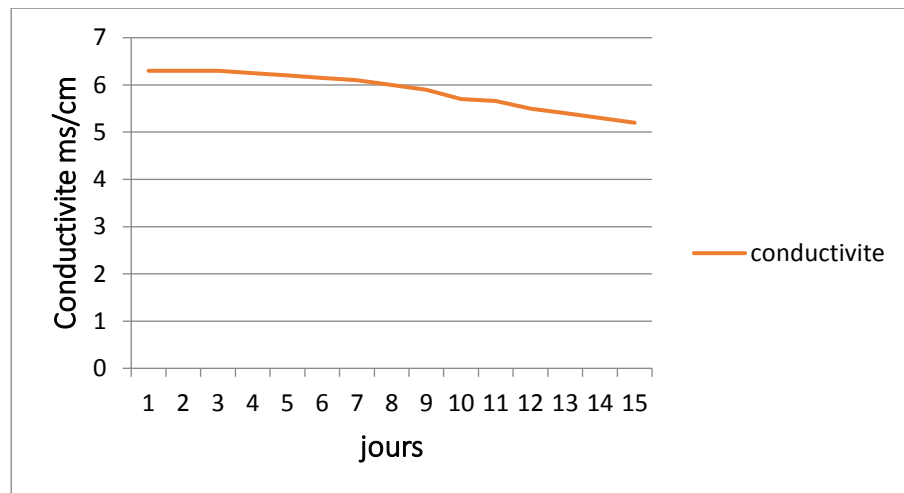


Figure (IV.4) : Evolution de la Conductivité électrique (CE) dans le milieu de culture de la spiruline.

La diminution de la CE est due au manque de salinité, et ce dernier est due à l'absorption de chlorure sodium par la spiruline.

FERHAT Wafa et LAKEHAL Sara a servi culture et production de la spiruline *Arthrospira platensis* dans la région d'El 'Oued nous avons trouvé leurs résultat sont augmenté mais pour nous les valeurs diminuent.

1-1-5- NH₃ et NO₂

D'après les résultats de la NH₃ et NO₂ mesurée au niveau d'aquarium on observe un manque de valeur de dioxyde d'azote(NO₂) et de l'ammoniac (NH₃).

Le manque de dioxyde d'azote (NO₂) et ammoniac (NH₃) est de fournir de l'absence de NH₃ et NO₂ dans l'aquarium.

1-1-6- NO₃ et NT

D'après les résultats du nitrate et nitrogène totale de mesuré au niveau d'aquarium on observe une diminution de la NO₃ et de NT pendant les 15 jours (Figure IV.5.6).

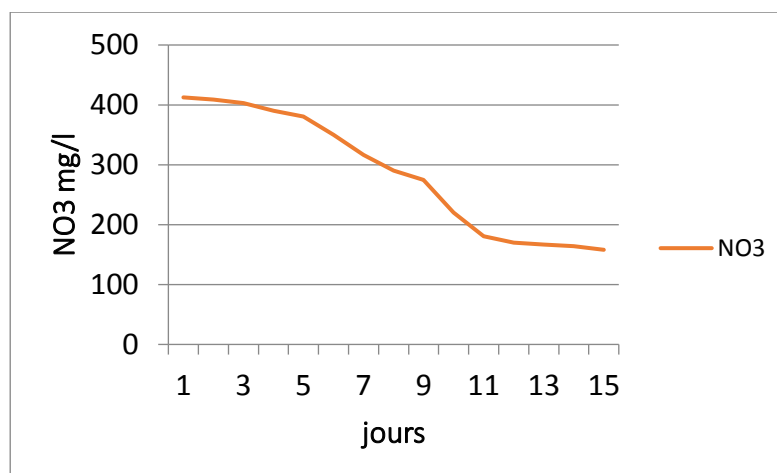
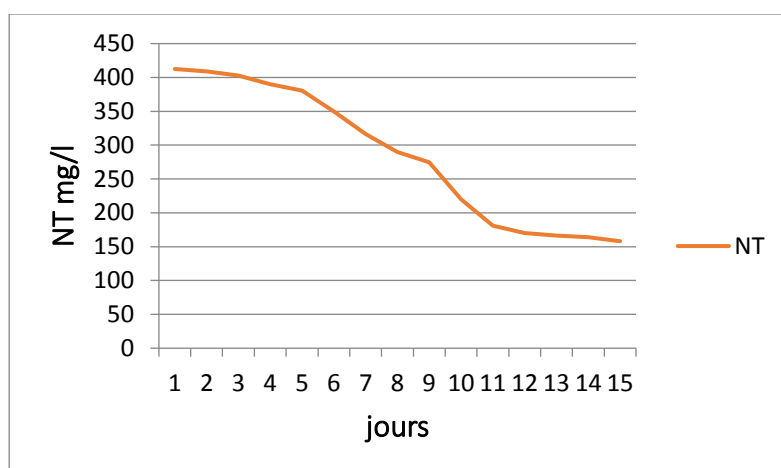


Figure (IV.5) : Evolution du nitrate dans le milieu de culture de la spiruline.**Figure (IV.6) :** Evolution du nitrogène totale dans le milieu de culture de la spiruline.

Notez une diminution continue de la valeur de la NO₃ et de NT de 412,5 mg/l le premier jour jusqu'à ce qu'il atteigne 158 mg/l dans le 15 jour.

La diminution du nitrate et nitrogène totale est due à l'absorption du nitrate par la spiruline pour la source d'azote et la diminution du nitrogène totale est due au nitrate dans le milieu.

Tableau (IV.2):

2 - Suive de la bioremédiation du polluant organique par *Arthrospira platensis*

Milieu ordinaire = Eau d'entre filtre et stérile + 8g Bicarbonate de sodium

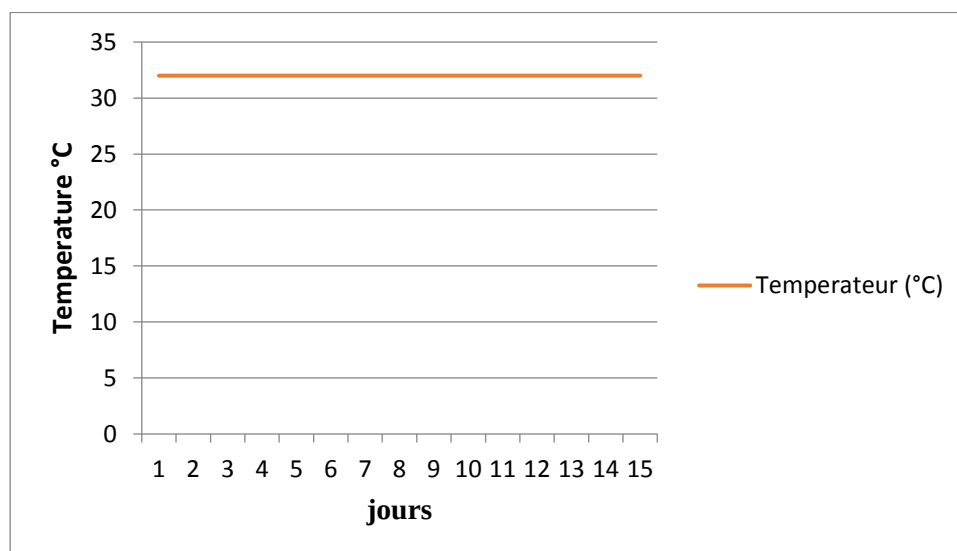
	1	3	5	7	9	11	13	15
T	32	32	32	32	32	32	32	32
pH	8.2	8.3	8.5	8.8	9.1	9.4	9.5	9.9
Biomasse (mg/l)	350	370	390	450	630	960	840	770
Conductivité (ms/cm)	6.3	6.3	6.2	6.1	5.9	5.66	5.4	5.2
NH₃ (mg/l)	80	75	62	55	30	22	20	18
NO₂ (mg/l)	0.950	1.020	2.280	3.650	2.470	1.660	1.120	0.620
NO₃ (mg/l)	0.820	0.930	1.130	1.620	2.390	1.710	1.550	1.270
NT (mg/l)	135	122	106	98	77	71	66	60

Tableau (IV.3) : Analyse d'aux d'entrée et de sortie de la STEP Hassani Abdelkrim.

Amont STEP * (Eau brute)						
Paramètres de l'auto-surveillance	N-NO2 (mg/l)	N-NO3 (mg/l)	NT (mg/l)	Conductivité (µS/cm)	T(°C)	pH
Moyenne	0,13	0,83	115,33	5,44	22,17	7,61
Aval STEP (Eau épurée)						
Paramètres de l'auto-surveillance	N-NO2 (mg/l)	N-NO3 (mg/l)	NT (mg/l)	Conductivité (µS/cm)	T (°C)	pH
Moyenne	0,69	2,05	87,57	5,40	19,19	7,80

2-1- Température

D'après les résultats du Température mesuré au niveau d'aquarium on observe une stabilité de valeur température (32 °C), cette stabilité est due à la présence de thermorégulateur.

**Figure (IV.7) :** Evolution de la Température dans l'eau d'entre filtre.

FERHAT Wafa et LAKEHAL Sara a servi culture et production de la spiruline *Arthrospira platensis* dans la région d'El 'Oued nous avons trouvé le résultat inférieur .

2-2- pH

D'après les résultats du pH mesuré au niveau d'aquarium on observe une évolution du pH pendant les 15 jours, de 8,2 le premier jour jusqu'à ce qu'il atteigne 9,9 dans le 15 jour. (Figure IV.8) .

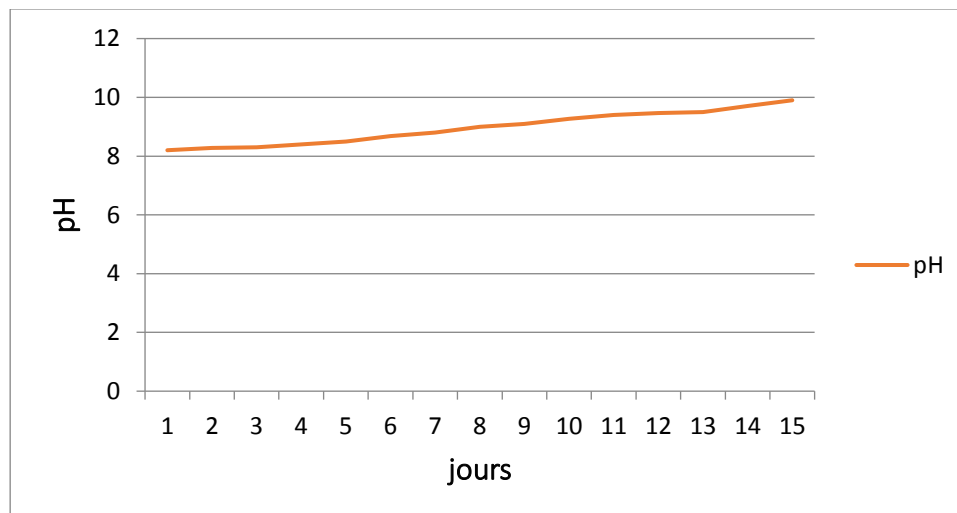


Figure (IV.8) : Evolution du pH dans l'eau d'entre filtre.

L'augmentation du pH est due à la présence de bicarbonate de sodium dans milieu de culture, la spiruline pour la photosynthèse a besoin de CO_2 , elle arrive à l'air ou au bicarbonate de sodium. le bicarbonate de sodium est transféré à la CO_2 liquide + sodium, le CO_2 liquide aqueux dans l'eau et absorbé par la spiruline et le sodium augmente la valeur de OH^- , et ce dernier due l'augmentation de pH.

Plus le processus de photosynthèse augmente, plus le CO_2 est absorbé, plus le pH est élevé.

Dans mémoire d'étude comparative de deux types d'eau (eau de source, eau de forage) pour la culture de la spiruline *Arthrospira platensis* nous avons trouvé le même résultat (une augmentation de pH).

2-3- Biomasse

D'après les résultats de la biomasse mesurée au niveau d'aquarium on observe une évolution de la biomasse de premier jour 350mg/l aux 11 jours 960mg/l et une diminution de 13 jours à la 770mg/l dans 15 jours (Figure IV.9).

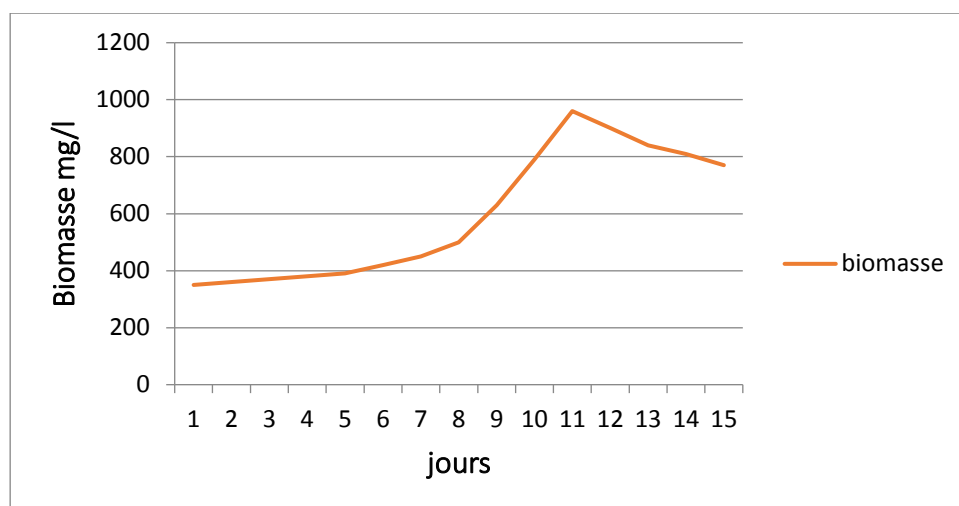


Figure (IV.9) : Evolution de la biomasse dans l'eau d'entre filtre.

L'augmentation de la biomasse est due de fournir toutes les conditions appropriées de la croissance (pH, Température, nutriment, lumière...) et la diminution due à la diminution une ou plusieurs condition de croissance.

L'augmentation de la biomasse de spiruline dans la bioremédiation du polluant organique par *Arthrospira platensis* était moins par rapport à la croissance d'*Arthrospira platensis* dans le Milieu Zarrouk parce que la condition de croissance dans le Milieu Zarrouk il est optimale. Walter W. Mulbry a servi traitement des effluents de lisier de porc à l'aide d'algues d'eau douce : production, récupération des éléments nutritifs et composition élémentaire de la biomasse algue à quatre taux de charge des effluents, nous avons trouvé le même résultat quant à biomasse (une augmentation de biomasse et puis un diminution mais l'augmentation plus grand par rapport biomasse de walter).

2-4- Conductivité

D'après les résultats de la CE mesurée au niveau d'aquarium on observe une diminution de la CE de 20,3 ms/cm le premier jour jusqu'à ce qu'il atteigne 18,6 ms/cm dans le 15 jour (Figure IV.10).

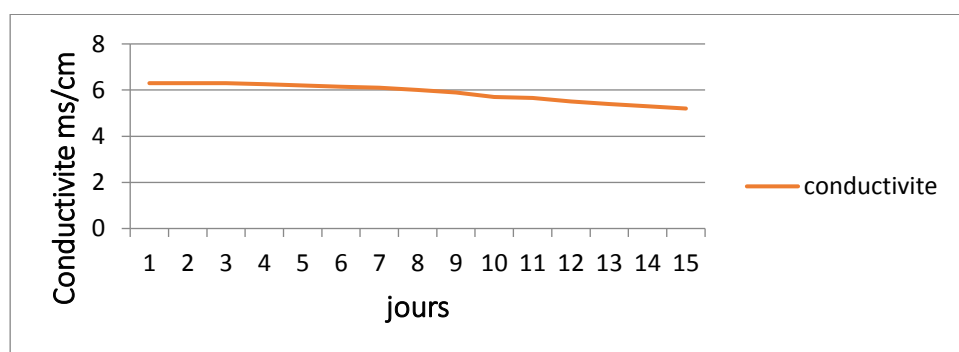


Figure (IV.10) : Evolution du Conductivité électrique dans l'eau d'entre filtre.

La diminution de la CE est due à l'utilisation d'*Arthrospira platensis* les minéraux des eaux comme des nutriments.

Djaghoubi. A a servi effet de la bioaccumulation sur la qualité des eaux d'irrigation de la région de Ouargla, nous avons trouvé le même résultat quant à Conductivité électrique.

2-5- NH_3 et NO_2 et NO_3

D'après les résultats de la NH_3 et NO_2 et NO_3 mesurée au niveau d'aquarium on observe une diminution de la NH_3 de 80 jusque-là 18 mg/l. NO_2 et NO_3 on note une augmentation jusque 3,650 mg/l pour le NO_2 et 2,390 mg/l pour le NO_3 et après une diminution par jusque-là 0,620 mg/l pour le NO_2 et 1,270 mg/l pour le NO_3 .

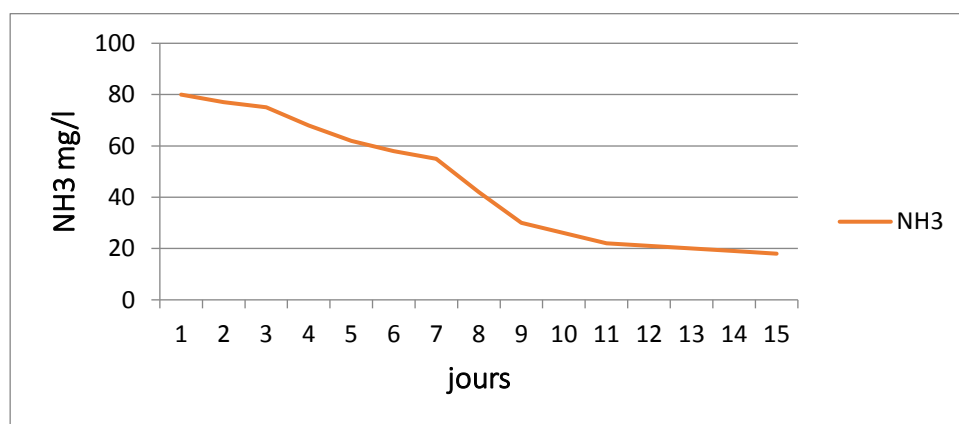


Figure (IV.11) : Evolution de l'Ammoniac (NH_3) dans l'eau d'entre filtre.

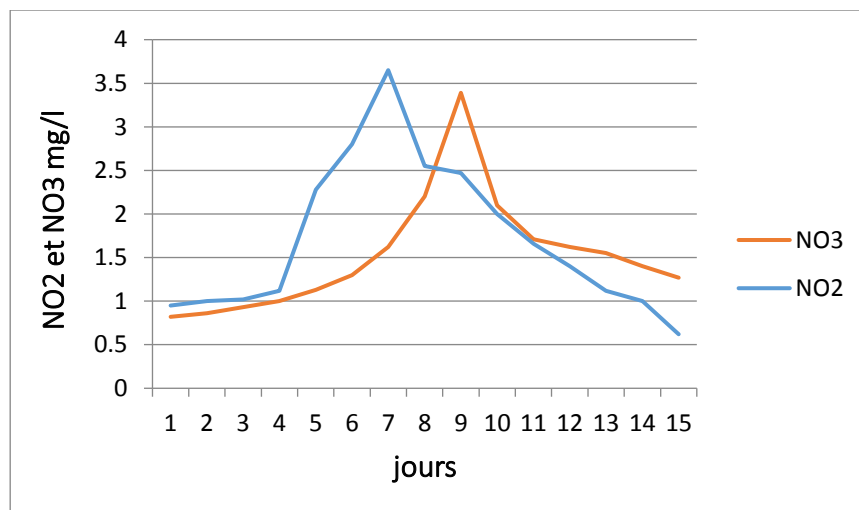


Figure (IV.12) : Evolution de Nitrite (NO_2) et Nitrate (NO_3) dans l'eau d'entre filtre.

La augmentation et la diminution NH_3 et NO_2 et NO_3 est due à la bioconversion biologique et chimique de ammoniac, nitrite, nitrate de cycle d'azote.



La spiruline absorbe le ammoniac (préférée) et nitrate (acceptable) dans de pH inférieur 10,5 Yuwadee Peerapornpisal a servi culture de la spiruline platensis en anaérobie porcine effluent de traitement des eaux usées nous avons trouvé le même résultat quant à l'ammoniac, comme pour le nitrate nous avons trouvé qu'il diminuait légèrement diminué et après une légère augmentation puis diminuait avec le temps.

Meng Fanping a servi culture de microalgues dans les effluents secondaires : amélioration de la biomasse algale, de l'élimination des nutriments et de la productivité des lipides nous avons trouvé une augmentation puis une diminution de nitrite.

2-6- NT

D'après les résultats de la NT mesurée au niveau d'aquarium on observe une diminution de la NT par rapport les tempes, de 135 mg/l le premier jour jusqu'à ce qu'il atteigne 60 mg/l dans le 15 jour (Figure N° 31).

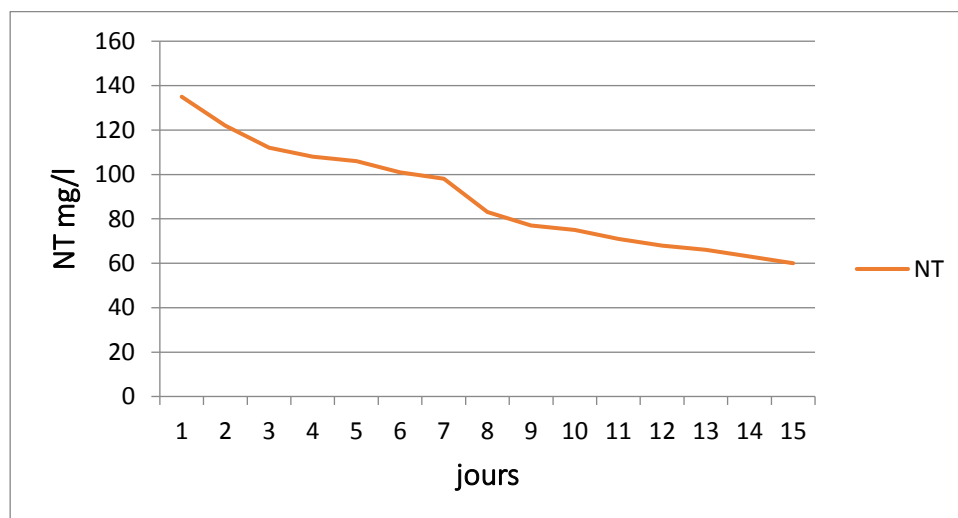


Figure (IV.13) : Evolution de Nitrogène totale (NT) dans l'eau d'entre filtre.

La diminution du nitrogène total est due à la diminution ammoniac et de nitrite et le nitrate.

Walter W. Mulbry a servi traitement des effluents de lisier de porc à l'aide d'algues d'eau douce : production, récupération des éléments nutritifs et composition élémentaire de la biomasse algue à quatre taux de charge des effluents, nous avons trouvé la valeur de nitrogène totale augmen

Conclusion générale

Conclusion générale

La bioremédiation par les microalgues et la spiruline est définie comme l'utilisation de micro-organismes pour éliminer et détoxifier efficacement les polluants grâce à leurs diverses capacités métaboliques. Les microalgues ont un grand potentiel et peuvent être utilisées pour le traitement de différents types d'eaux usées. La biorestauration des eaux usées à base de microalgues est très efficace, efficace, respectueuse de l'environnement et économique.

Notre étude nous a permis d'obtenir les résultats suivants, Les résultats du suivi de croissance d'*Arthrospira platensis*, la stabilité de la température (32 °C), augmentation du pH jusqu'à 10,5 et une augmentation de biomasse à 350 jusqu'à 1350 et puis une diminution jusqu'à 1050, une diminution de la CE de 20,3 ms/cm jusqu'à ce 18,6 ms/cm et absence de NH₃ et NO₂, une diminution de valeur de NO₃ et de NT de 412,5 mg/l jusqu'à 158 mg/l. les résultats du suivi de la bioremédiation du polluant organique par *Arthrospira platensis*, la stabilité de la température (32 °C), augmentation du pH de 8,2 jusqu'à 9,9 et une augmentation de biomasse à 350 jusqu'à 960 et puis une diminution jusqu'à 770, une diminution de la CE de 6,3 ms/cm jusqu'à ce qu'il atteigne 5,2 ms/cm, observe une diminution de la NH₃ de 80 jusque-là 18 mg/l. NO₂ et NO₃ on note une augmentation jusque 3,650 mg/l pour le NO₂ et 2,390 mg/l pour le NO₃ et après une diminution par jusque-là 0,620 mg/l pour le NO₂ et 1,270 mg/l pour le NO₃. une diminution de la NT de 135 mg/l jusqu'à ce qu'il atteigne 60 mg/l.

Les résultats obtenus montrent que les plus importants est la spiruline a un taux important dans l'élimination de l'ammoniac.

En conclusion, la spiruline *Arthrospira platensis* avoir la capacité de élimination de polluant organique dans la bioremédiation d'eaux usée.

Perspective et recommandation:

Dans le cadre d'un travail au futur, il serait souhaitable :

- Utilisation les eaux traités dans les différents activités fournières, par exemple, on l'utilisée dans l'irrigation des végétaux (les arbres) et de forêt ; quand cet eau est riche en minéralisation et en sels minéraux.
- Obligation d'effectuer un traitement biologique efficace des eaux usées à l'aide d'un mélange des microalgues et de bactéries comme une étape supplémentaire au traitement physique, chimique et biologique présent dans la station d'épuration.

- Si nous avons les capacités nécessaires, nous utilisons plus d'une expérience et utilisons le témoin positif.
- l'utilisation de technologies modernes et avancées dans la bioremédiation.
- Développer et promouvoir le domaine de la recherche dans la culture de la spiruline et son importance dans le traitement d'eaux usées.

Références

Références Bibliographiques

- 1- AHOUNOU M. N., 2018 : La spiruline : Un complément alimentaire en conseil à l'officine. Enquête d'utilisation. Thèse pour l'obtention d'un Diplôme d'Etat de Docteur en Pharmacie, Université de Rouen, UFR de Médecine et de Pharmacie, p 17-27, 40.
- 2- Al-ghanayem, A. A. (2017). Antimicrobial activity of *Spirulina platensis* extracts against certain pathogenic bacteria and fungi. *Advances in BioResearch*, 8(6), p 98.
- 3- Ali, H., Khan, E., Sajad, M.A., 2013. Phytoremediation of heavy metals-concepts and applications. *Chemosphere* 91, 869–881, p870.
- 5- AROUA, A. (1994). L'homme et son milieu. Edition société national. Alger, 73-85p.
- 6- Asano T. (1998). Wastewater reclamation and reuse. *Water quality management library*.
- 7- Ashraf, S., Ali, Q., Zahir, Z.A., Ashraf, S., Asghar, H.N., 2019. Phytoremediation: environmentally sustainable way for reclamation of heavy metal polluted soils. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 174, 714–727, p 718.
- 8- Assobhei, O. 2009. Traitement des boues : Cas du procédé MOROCOMP développé dans le cadre du projet LIFE 05 TCY/MA/000141. Atelier Ass. Epur. Réut. Agadir, 7-11 décembre 2009. Univ. Chouaib Doukkali, El Jadida – Maroc. 51p.
- 9- Barth et Leo. (2019). Le Guide Complet de la Spiruline, Article scientifique, <https://naturalathleteclub.com/blog/savoir-spiruline-bienfaits>, 3, 5, 12, 21p.
- 10- BECERRA CELIS G., 2009. Proposition de stratégies de commande pour la culture de microalgues dans un photo bioréacteur continu. Thèse doctorat Génie des Procédés. École centrale Paris. 266p.
- 11- Benahmed Djilali A., (2012). Analyse des aptitudes technologiques de poudres de dattes (phoenix-dactylifera) améliorées par la spiruline. Étude des propriétés rhéologiques, nutritionnelles et antibactériennes. Thèse de Doctorat en Technologie Alimentaire. Université M'hamed Bougara, Boumerdès, 119 p.
- 12- Borowitzka, M. A. (1992). Algal biotechnology products and processes—matching science and economics. *Journal of applied phycology*, 4(3), 267-279.
- 13- BOUDEAL., DJOUID, H. (2003). Pollution de l'Oued boussellem par les eaux usées urbaines et industrielles et impact de leur utilisation dans l'irrigation. Thèse ing, des écosystèmes universitaires, Stif. 6-13p.
- 14- Boukary, S, (2018). Traitement des eaux usées industrielles par des procédés membranaires sous climat sahélien : cas des eaux usées de brasserie au Burkina Faso. p 9, 10.

- 15- BOUZIANI, M. (2000). L'eau de la pénurie aux maladies. Edition IBN-Khaldoun Oran. 247p.
- 16- C. Sili, G. Torzillo, A. Vonshak, Arthrospira (spirulina), in: B.A. Whitton (Ed.), Ecol. Cyanobacteria II Their Divers. Sp. Time, Springer, 2012, pp. 677–705.
- 17- Céline Pernin, (2003). Épandage de boues d'épuration en milieu sylvo-pastoral. Étude des effets in situ et en mésocosmes sur la mésofaune du sol et la décomposition d'une litière de chêne liège (*Quercus suber* L.) Ecole doctorale : Sciences de l'environnement, MARSEILLE (AIX-MARSEILLE III).
- 18- Charpy L, (2008). Colloque International « la Spiruline et le développement », formation et transfert de technologie, en matière de culture de Spiruline: 28 - 29 et 30 avril 2008. Toliara -SUD-OUEST MADAGASCAR: 131,132.134
- 19- Chedly ABDELLY , 2006, Bioremédiation / Phytoremédiation , département des sciences naturelles, université de Tunis, pages: 6 ,7,8.
- 20- Cunningham, S. D. et Berti, W. R. (1993). Remediation of contaminated soils with green plants : an overview. *In Vitro Cellular and Developmental Biology – Plant Journal*, 25, 29. 207.
- Cruchot H, 2008. La Spiruline, Bilan et Perspective. Thèse docteur en pharmacie. université de France-Comite.
- 21- Dansou D. 2002. *developpement de la culture de la spiruline (spirulina platensis) et valorisation de celle-ci au burkina faso*, diplôme d'études supérieures spécialisées (D.E.S.S.), université d'Ouagadougou, p 12.
- 22- Desjardins R, (1997). Le traitement des eaux. 2ème édition. Ed. Ecole polytechnique.
- 23- Der Hok W. V. 2007. A Framework for a Global Assessment of the Extent of Wastewater Irrigation: The Need for a Common Wastewater Typology. Wastewater Use in Irrigated Agriculture coordinating the Livelihood and Environmental Realities. Eds. CAB Inter. Inter Water Management Institute, and Inter. Devel. Research Centre. pp 16-29p.
- 24- Dipesh Kumar, Bhaskar Singh, and Ankit, 2019, Phycoremediation of Nutrients and Valorisation of Microalgal Biomass: An Economic Perspective, 2-4p.
- 25- Doumenge F, Durand-Chastel H, Toulemont A. 1993. Spiruline, algue de vie/ Spirulina, algae of life. Bulletin de l'institut Océanographique de Monaco. pp 7-11.
- 26- Dr. Surajit Das. (2014). Microbial Biodegradation and Bioremediation, Laboratory of Environmental Microbiology and Ecology (LEnME), Department of Life Science, National Institute of Technology, Rourkela, Odisha, India. P 11.

- 27- Edline F. (1996)., L'épuration physico-chimique des eaux.3eme édition. Ed. CEBEDOC, Paris, 283p.
- 28- El Haite H., 2010. Traitement des eaux usées par les réservoirs opérationnels et réutilisation pour l'irrigation, thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne pp. 44, 46-49.
- 29- FAO. (1992). Wastewater treatment and use in agriculture. Bulletin FAO d'irrigation et de drainage n° 47. Rome.
- 30- FAO. (2002), The use of treated waste water (tww) in forest plantations in the near east region Near east forestry commission (fifteenth session).
- 31- FAO. (2003)., L'irrigation avec des eaux usées traitées : Manuel d'utilisation. FAO Irrigation and Drainage paper, 65p
- 32- FILALI R., 2012. Estimation et commande robustes de culture de microalgues pour lavalorisation biologique de CO₂.thèse doctorat Sciences et Technologies de l'Informationdes télécommunications et des Systèmes ,AUTOMATIQUE. HAL.p20, 22, 23, 25, 26,28
- 33- Fox ,1999- spiruline, Technologie pratique et promesse – France, 240p
- 34- Fox R.D., (1999). La Spiruline : Technique, Pratique et Promesse. *Edisud*. Aix en Provence, N° 246, p 18-129.
- 35- Garzón-Zúñiga, M, González-Martínez, S. 1996.Biological phosphate and nitrogen removal in a biofilm sequencing batch reactor. *Water Sci. Technol*, p293–301.
- 36- Gerard J T, Berdell R F et Christine L C., 2003. Introduction à microbiologie. Cégepde de Saint-Jérôme, Canada, pp. 842-847.
- 37- Girardin-Andréani C. 2005. Spiruline : système sanguin, système immunitaire et cancer. *Phytothérapie*; 4,p. 158-161.
- 38- Goulambasse, T. R. (2018). La Spiruline : Activités Thérapeutiques et son Intérêt dans la Lutte contre la Malnutrition à Madagascar, Thèse pour le diplôme d'état de Docteur en Pharmacie, université de Lille, p 46.
- 39- Grégorio C et Badolt P M., 2007. Traitement et épuration des eaux industrielles polluées Presses universitaire de franche-comté, pp. 18-83.
- 40- Grosclaude G., 1999. L'eau usages et polluants, Tome II. INRA., paris, pp. 127-184.
- 41- Humenik, F. J., Hanna, G. P, 1971, Algal-bacterial symbiosis for removal and conservation of wastewater nutrients. *J.W.P.C.F.*, 43 (4): 580-594.INRA. Paris. P210.
- 42- IVAN A. GOLUBEV. Inc (2011). HANDBOOK OF PHYTOREMEDIATION. (ENVIRONMENTAL SCIENCE, ENGINEERING AND TECHNOLOGY). Nova Science Publishers, p 65, 66.

- 43- J. Komárek, H. Kling, J. Komárková. Filamentous cyanobacteria, In *John D. Wehr & Robert G. Sheath* (ed), *Freshwater Algae of North America: Ecology and Classification*, New York, 1998, pp. 117-196.
- 44- Jourdan, J. P. (2018). Manuel de culture artisanale pour la production de la spiruline. disponible sur : (dernière consultation septembre 2020)
<http://spirulinefrance.free.fr/Ressources/Manuel%20du%202%20fevrier%202018.pdf> .
- 45- K. Bauddh & B. Singh & J. Korstad. (2017). Phytoremediation Potential of Bioenergy Plants .p 8, 9.
- 46- Kaushik, P., & Chauhan, A.Springer nature,Singapore (2008). In vitro antibacterial activity of laboratory grown culture of *Spirulina platensis*. *Indian Journal of Microbiology*, 48(3), 348-352.
- 47- LADJEL, F. (2006). Exploitation d'une station d'épuration à boue activée niveau 02 Centre de formation au métier de l'assainissement. CFMA-Boumerdes, p80
- 48- Lecointre, R. (2017). Optimisation de la production de spiruline dans une ferme à Madagascar afin de lutter contre la malnutrition infantile, MEMOIRE INGENIEUR agroalimentaire de l'école nationale vétérinaire, agroalimentaire, et l'alimentation, Oniris, nante atlantiques, p 5,14,
- 49- Madigan Met Martinto J., 2007. Brock biologie des micro-organismes, le édition. Nouveaux horizons, p 920-925.
- 50- MANET A., 2016 : La spiruline : Indications Thérapeutiques, Risques Sanitaires et Conseils à l'Officine, Thèse présentée pour l'obtention du titre de Docteur en pharmacie, Diplôme d'état, Université Grenoble Alpes, Faculté de Pharmacie de Grenoble,p12.
- 51- Medina-Bellver, J.I., P. Marín and A. Delgado. 2005. Evidence for *in situ* crude oil biodegradation after the Prestige oil spill. *Environmental Microbiology* 7: p773–779.
- 52- METAHRI Mohammed Saïd, (2012). Elimination simultanée de la pollution azotée et phosphatée des eaux usées traitées, par des procédés mixtes, cas de STEP EST de ville de TIZI_OUZOU, Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri de TIZI_ OUZOU,p5, 6.
- 53- MICHKA, 2005 : La spiruline pour l'homme et la planète, Terra Magna Georg..
- 54- N. K. Arora & N. Kumar. (2019). Phyto and Rhizo Remediation. p9,71, 72 .
- 55- NIANGORAN N'GORAN U. F., 2017 : Optimisation de la culture de la spiruline en milieu contrôlé : Eclairage et Estimation de la Biomasse, Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse, Université Toulouse 3, Paul Sabatier, p 39.
- 56- Parhad, N. M., Rao, N. U, 1974,Effect of pH on survival of *Escherichia coli*. *Jourl. Water Poll. Control. Fed.*, 46 , p980-986.

- 57- Pearson, H. W, Mara, D. D, Mills S W, Smallman, D. L, 1987, Factors determining algal population in waste stabilization ponds and the influence of algae on pond performance, p131-140.
- 58- PERRAULT A., 2017 : A la Recherche de Nouveaux Caroténoïdes Super Antioxydants, Portail Actus, INRA, Université d'Avignon, France.
- 59- Pierlovizi, C. (2007). L'Homme et la Spiruline: Un avenir commun? Composition chimique, intérêts alimentaires et activités biologiques. Paris V- René Descartes, Faculté des Sciences Pharmaceutiques et Biologiques, Paris, p162.
- 60- Pierre ROGER et Vincent JACQ. (2000). Laboratoire de Microbiologie IRD Institut de Recherche pour le Développement IRD (ex ORSTOM).
- 61- Pouliot, Y., Delanoue, J, 1985, Mise au point d'une installation pilote d'épuration tertiaire des eaux usées par production de microalgues. Rev. Franç. des sci. De l'eau, 4, p207-222.
- 62- PERSON, Julie. 2010. *LIVRE TURQUOISE Algues, filières du futur*. s.l.: Adebitech, Romainville, 2010. p182.
- 63- Prescott, Harley, Klein. 2007. Microbiologie. 2ème Edition de Boeck, Paris, p837-855.
- 64- Qureshi, M.A.; Ali, R.A., and Hunter, R. (1995). Proc 44th Western Poultry Disease Conference, Sacramento, California, p117-121.
- 65- R. Rippka, J. Deruelles, J.B. Waterbury, M. Herdman, R.Y. Stanier, Generic assignments, strain histories and properties of pure cultures of cyanobacteria, J.Gen. Microbio.111 (1979) p1-6.
- 66- Romdhane Marwa, 2010. Immobilisation des bactéries isolées à partir des zones minières sur des supports polymériques pour la bioremédiation, Mémoire de projet de mastère soutenu à Sidi Thabet, 49 p2.
- 67- R. S. Ambasht & N. K. Ambasht. 2003. Modern Trends in Applied Aquatic Ecology. p135.
- 68- R.Y. Stanier, R. Kunisawa, M. Mandel, G. Cohen-Bazire, Purification and properties of unicellular blue-green algae (order Chroococcales). Bacterio. Rev.35 (1971) p171-205.
- 69- Rajeev Pratap Singh, Alan S. Kolok, Shannon L. Bartelt-Hunt, 2019. Water Conservation, Recycling and Reuse: Issues and Challenges. p31,83,84
- 70- RICHARD, C. (1996). Les eaux, les bactéries, les hommes et les animaux. Ed. Scientifiques et médicale Elsevier. Paris.
- 71- Ross E. et Dominy W. 1990. The nutritional value of dehydrated, blue-green algae (*Spirulina platensis*) for poultry. *Poultry Science*; 69 (5): p 794-800.

- 72- S. Ge, P. Champagne, Nutrient removal, microalgal biomass growth, harvesting and lipid yield in response to centrate wastewater loadings, *Water Res.* 88 (2015) p604–612.
- 73- S. K. Gupta, F. Bux (eds.)(2019), *Application of Microalgae in Wastewater Treatment, Volume 2: Biorefinery Approaches of Wastewater Treatment*.p24,87
- 74- SADI M., 2012. Les micro algues: un défi prometteur pour des biocarburants propres. des *Energies Renouvelables SIENR*.vol.12 (195-200) p195.
- 75- Salama E-S, Kurade MB, Abou-Shanab RAI, El-Dalatony MM, Yang I-S, Min B, Jeon B-H (2017), Recent progress in microalgal biomass production coupled with wastewater treatment for biofuel generation. *Renew Sust Energ Rev* 79,p1189–1211.
- 76- Sarwar, N., Imran, M., Shaheen, M.R., Ishaque, W., Kamran, M.A., Matloob, A., Rehim, A., Hussain, S., 2017. Phytoremediation strategies for soils contaminated with heavy metals: modifications and future perspectives. *Chemosphere* 171, p710–721.
- 77-SGUERA S., 2008 : *Spirulina Platensis* et ses Constituants, Intérêts Nutritionnels et Activités Thérapeutiques, Thèse pour obtenir le Diplôme d'Etat de Docteur en Pharmacie, Université Henri Poincaré - Nancy 1, Faculté de Pharmacie, p12,18,29,34,136.
- 78- Shao, W., Ebaid, R., El-Sheekh, M., Abomohra, A., & Eladel, H. (2019). Pharmaceutical applications and consequent environmental impacts of *Spirulina* (Arthrospira): An overview. *Grasas y Aceites*, 70(1), p292.
- 79- SIALVE B, STEYER J-P., 2013.Les microalgues, promesses et défis. *Innovations agronomiques*. vol.26. p(25-39).
- 80- Sirakov I, Velichkova K, Stoyanova S, Staykov Y (2015) The importance of microalgae for aquaculture industry. Review. *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*, 2(4), p81–84.
- 81- Théodore, Z. G. H. C. (2017). Optimisation de la culture de la spiruline en milieu contrôlé: éclairage et estimation de la biomasse (Doctoral dissertation, Toulouse 3).
- 82- THOMAS, O. (1955). *Météorologie des eaux résiduaires*. Tec et Doc, Ed Lavoisier Cedeboc, p 135-192.
- 83- Usharani, G., Saranraj, P., & Kanchana, D. (2012). *Spirulina* cultivation: a review. *Int J Pharm Biol Arch*, 3(6), p1327-1341.
- 84- Vaillant J.R. (1974)., *Perfectionnement et nouveautés pour l'épuration des eaux résiduaires: eaux usées urbaines et eaux résiduaires industrielles*. Ed. Eyrolles. Paris, p413.
- 85- Vidalo, J. L. (2015). *Spiruline, l'algue bleue de santé et de prévention*, Livre, Chapitre 3 / Cancer et Spiruline, p 101, Chapitre 16 / Universelle spiruline. A chacun son profil p. 240.

- 86-** Y. Chang, Z. Wu, L. Bian, D. Feng, D.Y.C. Leung, Cultivation of *Spirulina platensis* for biomass production and nutrient removal from synthetic human urine, *Appl. Energy* 102 (2013) p427–431, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.07.024>.
- 87-** Y.V. Nancharaiah & Vayalam P. Venugopalan.(2019) .Microbial Biofilms in Bioremediation and Wastewater Treatment.p228, 230, 231.
- 88-** Yakoot, M., & Salem, A. (2012). *Spirulina platensis* versus silymarin in the treatment of chronic hepatitis C virus infection. A pilot randomized, comparative clinical trial. *BMC gastroenterology*, 12(1), p1-9.

Site d'internet

- 1-**<https://fr.hach.com/test-en-cuve-pour-le-nitrate-0-23-13-5-mg-l-no-sub-3-sub-n/product?id=26370275740>
- 2-**<https://fr.hach.com/test-en-cuve-pour-le-nitrite-0-6-6-0-mg-l-no-sub-2-sub-n/product?id=26370275743>