

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Ahmed Draïa Adrar



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département d'Hydrocarbures et Energies Renouvelables

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de Master en :
Filière : Génie des Procédés
Spécialité : Génie Chimique

Thème :

Traitement des eaux usées par les microalgues

Préparé par :

M. Bouchentouf Mohammed

M. Abdarrahoumane Moussa

Membres de jury d'évaluation :

M. DAHOU Mohamed El Amine	Président	MCA	Univ. Adrar
Mlle. Dehmani Siham	Encadreur	MCB	Univ. Adrar
M. Hadj Kouider Mohammed	Examineur	MCA	Univ. Adrar

Année Universitaire : 2020/2021

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, louange à « Allah » le tout puissant qui nous a guidés sur le droit chemin tout au long du travail, et nous a inspiré les bons pas et les justes réflexes. Sans sa miséricorde, ce travail n'aura pas abouti.

Nous tenons à remercier particulièrement notre directrice de mémoire, Mademoiselle Siham Dehmani, d'avoir dirigé notre travail.

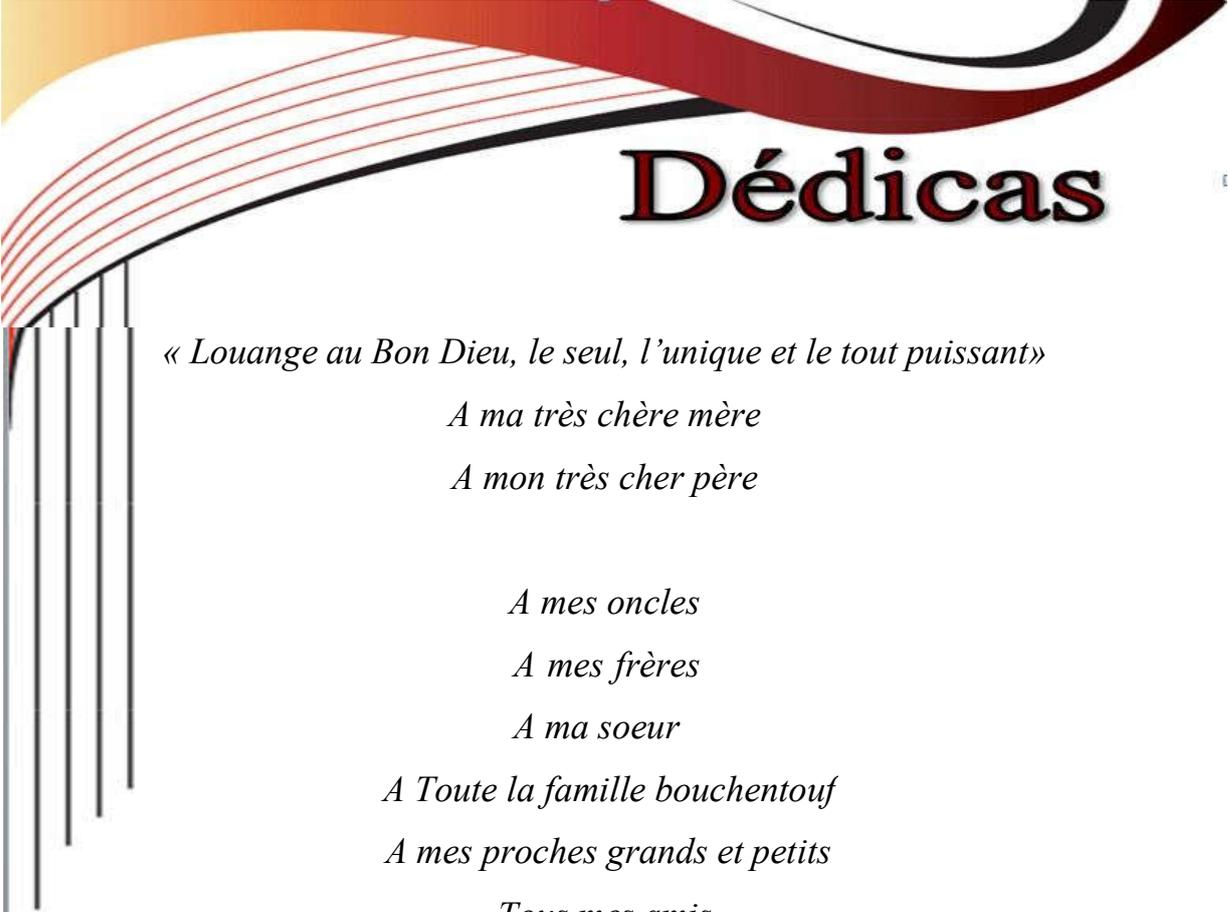
Une très grande reconnaissance va au Monsieur Dahou Amine de l'université d'adrar, pour l'honneur qu'il nous fait de présider le jury de ce travail.

Nous adressons également nos sincères remerciements au Monsieur Hadj Kouider Mohamed de l'université d'adrar d'avoir accepté de juger ce travail et d'apporter ses critiques tant constructives.

Nos remerciements vont également à Monsieur Bouelem abedelaali que Dieu lui accorde santé et prospérité.

Nous adressons notre profonde gratitude envers les différents membres de l'équipe de l'ANRH Adrar : Bahous Nasri, Sahraoui Fatiha, Koki Asia, Ben ibrahim ahra, Talhaoui Zohra, Dokhi Mobarek, Broukli Mostapha.

Nous remercions tous les professeurs du département d'hydrocarbure et énergies renouvelables.



Dédicas

« Louange au Bon Dieu, le seul, l'unique et le tout puissant »

A ma très chère mère

A mon très cher père

A mes oncles

A mes frères

A ma soeur

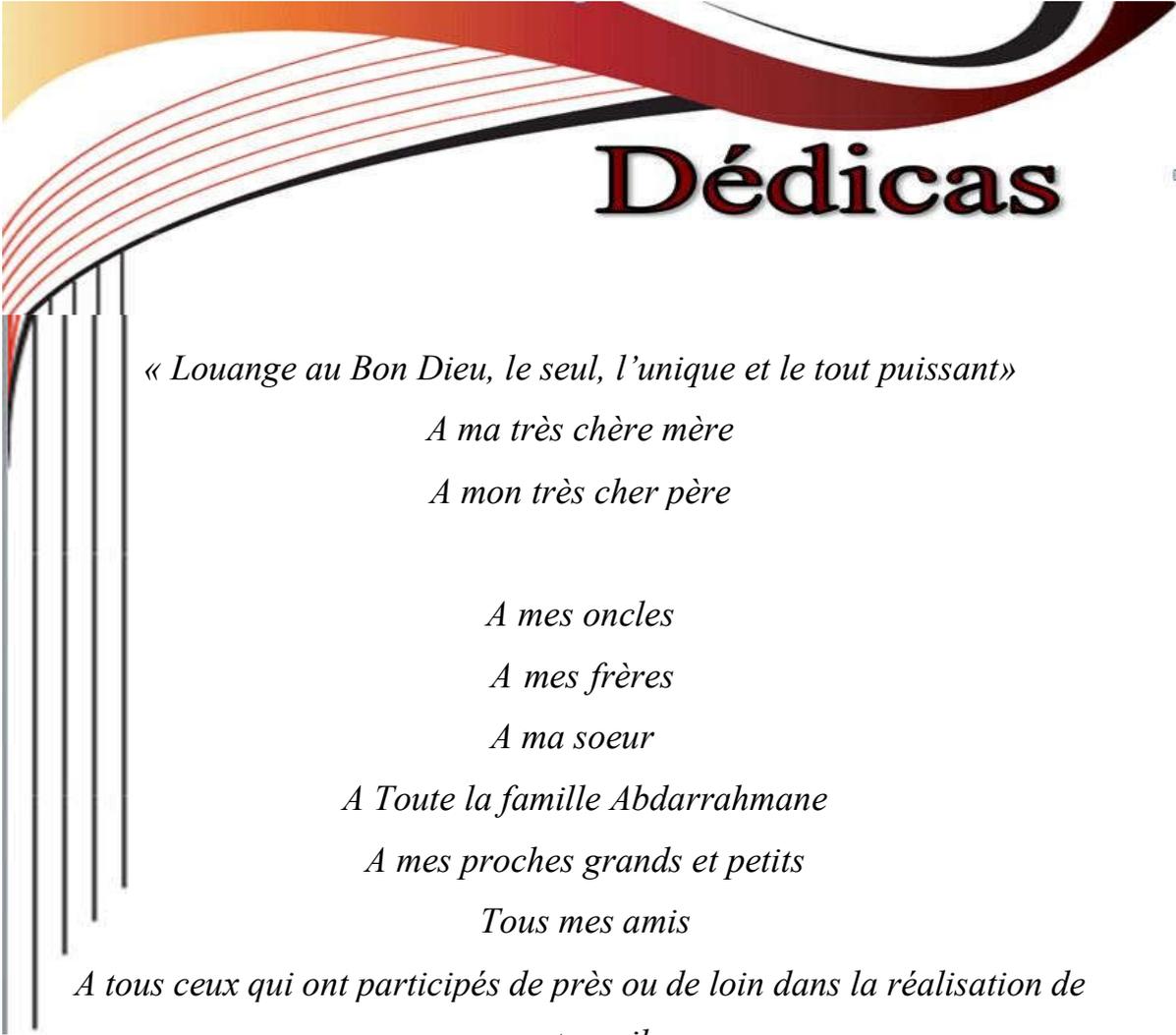
A Toute la famille bouchentouf

A mes proches grands et petits

Tous mes amis

*A tous ceux qui ont participés de près ou de loin dans la réalisation de
ce travail*

M.Bouchentouf



Dédicas

« Louange au Bon Dieu, le seul, l'unique et le tout puissant »

A ma très chère mère

A mon très cher père

A mes oncles

A mes frères

A ma soeur

A Toute la famille Abdarrahmane

A mes proches grands et petits

Tous mes amis

*A tous ceux qui ont participés de près ou de loin dans la réalisation de
ce travail*

M.Abdarrahmane

Résumé

Le traitement et l'évacuation des eaux usées est l'une des principales préoccupations environnementales dans les pays développés et les pays en développement. Cette eau chargée de matières organiques biodégradables, de produits chimiques inorganiques et organiques, de substances toxiques et de micro-organismes pathogènes, rend difficile le choix du procédé de traitement. Les choix de procédés économiques et efficaces sont la préoccupation de plusieurs chercheurs. L'utilisation de méthodes naturelles de traitement a prouvé son efficacité dans le traitement des déchets industriels et des eaux domestiques

Par conséquent, ce manuscrit est concentré à la culture des microalgues dans des systèmes fermés en utilisant les eaux usées comme un milieu de culture.

Chlorella pyrenoidosa, *Chlorococcum.sp.*, ont été cultivées dans les eaux usées domestiques provenant de la station d'épuration (STEP) du Ksar de M'raguen Adrar. Les taux d'élimination des matières polluantes par ces microalgues (*C.pyrenoidosa* et *Chlorococcum.sp.* étaient plus élevés que celles éliminées par le procédé de traitement utilisé au niveau de la station d'épuration.

L'efficacité d'élimination de NH_4^+ , PO_4^{3-} et DCO par *C.pyrenoidosa* était 85.71 %, 98.61% et 93.58% respectivement. Ainsi que la souche microalgale *Chlorococcum.sp* qui avait une capacité de réduire 83.92% d'ammonium, 99.88% d'ortho-phosphate et 80.76% de la demande chimique en oxygène. Par contre, le traitement par plantes (roseaux) n'avait pu éliminer d'ammonium (augmentation de la teneur de NH_4^+ plus de 0.3 mg/l).

Mots clés : microalgues, culture, pollution, STEP et eau usées.

Abstract

Wastewater treatment is one of the main environmental concerns in developed and developing countries. This water loaded with biodegradable organic matter, inorganic and organic chemicals, toxic substances and pathogenic microorganisms, makes it difficult to choose the treatment process. The choice of economical and efficient processes is the concern of many researchers. The use of natural treatment methods has proven its effectiveness in the treatment of industrial waste and domestic water. Therefore, this manuscript is focused in part on culturing microalgae in closed systems using wastewater as a culture medium.

Chlorella pyrenoidosa, *Chlorococcum.sp* were cultivated in domestic wastewater from the Ksar treatment plant (WWTP) in M'raguen Adrar. The rates of removal of pollutants by these microalgae were higher than those removed by the treatment process used at the wastewater treatment plant.

The removal efficiency of NH_4^+ , PO_4^{3-} and COD by *C. pyrenoidosa* was 85.71%, 98.61% and 93.58% respectively. As well as the microalgae strain *Chlorococcum.sp* which had an ability to reduce 83.92% ammonium, 99.88% orthophosphate and 80.76% of chemical oxygen demand. On the other hand, the treatment with plants (reeds) could not eliminate ammonium (increase in the NH_4^+ content more than 0.3 mg / l).

Key words: microalgae, culture, pollution, wastewater and WWTP.

المخلص

تعد معالجة المياه المستعملة و التخلص منها من الاهتمامات البيئية الرئيسية في البلدان المتقدمة والنامية. هذه المياه المليئة بالمواد العضوية القابلة للتحلل، والمواد الكيميائية العضوية وغير العضوية ، والمواد السامة والكائنات الدقيقة المسببة للأمراض ، تجعل من الصعب اختيار عملية المعالجة. يعد اختيار العمليات الاقتصادية والفعالة من اهتمامات العديد من الباحثين. لقد أثبت استخدام طرق المعالجة الطبيعية فعاليته في معالجة المخلفات الصناعية والمياه المنزلية لذلك ، تركز هذه المذكرة جزئيا على زراعة الطحالب الدقيقة في أنظمة مغلقة باستخدام مياه الصرف الصحي كوسيلة للزراعة وقد تمت زراعة كلوريل بيرانودوزا، كلوروكوكيم، في مياه الصرف الصحي من محطة التصفية قصر مراقن ادرار. كانت معدلات إزالة الملوثات بواسطة هذه الطحالب أعلى من تلك التي ازيلت بواسطة نظام المعالجة بالنباتات في محطة التصفية.

الكلمات المفتاحية: الطحالب، زراعة، الملوثات، المياه المستعملة و محطة التصفية

Table des matières

LISTE DES ABREVIATIONS.....	I
LISTE DES FIGURES.....	II
LISTE DES TABLEAUX	III
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I. GENERALITE LES EAUX USEES.....	4
I. 1. DEFINITION D’UNE EAU USEE	4
I. 2. SOURCES, MECANISMES ET SYMPTOMES DE LA POLLUTION DES EAUX.....	4
I. 2. 1. POLLUTION PHYSIQUE.....	5
I. 2.1.1. Pollution thermique.....	5
I. 2.1.2. Pollution radioactive.....	5
POLLUTION CHIMIQUE.....	6
POLLUTION BIOLOGIQUE.....	6
I. 2. 4. POLLUTION ORGANIQUE.....	7
ORIGINE DES EAUX USEES	7
ORIGINE DOMESTIQUE.....	7
ORIGINE AGRICOLES	8
ORIGINE PLUVIALES	9
I. 4. COMPOSITION DES EAUX USEES.....	9
I. 4. 1. MICROORGANISMES.....	9
I. 4. 1. 1. Les bactéries	9
I. 4. 1. 2. Les virus.....	10
I. 4. 1. 3. Les protozoaires.....	10
I. 4. 1. 4. Les helminthes.....	10
I. 4. 2. LES MATIERES EN SUSPENSION (MES).....	11
I. 4. 3. LES ELEMENTS TRACES, MINERAUX OU ORGANIQUES.....	11
I. 4. 3. 1. Les métaux lourds.....	11
I. 4. 3. 2. Les éléments toxiques organiques.....	12
I. 4. 4. LES SUBSTANCES NUTRITIVES	12
MESURE DE LA QUALITE DES EAUX	12
PARAMETRES ORGANOLEPTIQUES	13
PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES.....	13

PARAMETRES INDESIRABLES.....	13
PARAMETRES DE TOXICITE.....	13
PARAMETRES ORGANIQUES	13
PARAMETRES BACTERIOLOGIQUES.....	13
INFLUENCE DE LA POLLUTION SUR LES ETRES VIVANTS ET L'ENVIRONNEMENT .	13
I.6. 1. LES MORTALITES LIEES AUX ALTERATIONS DE LA PHYSICO-CHIMIE	14
I.6. 2. L'EUTROPHISATION DES MILIEUX	15
3. DES EFFETS TOXIQUES SUR LES ETRES VIVANTS.....	16
LA CONTAMINATION MICROBIOLOGIQUE DES ETRES VIVANTS.....	17
LES PERTURBATIONS ENDOCRINIENNES	18
TRAITEMENT DES EAUX USEES.....	19
LES PRETRAITEMENTS.....	20
Dégrillage	21
Les différents types de grilles et leur dimensionnement.....	22
Surface de grille.....	23
Déshuilage dégraissage.....	23
Dessablage	24
LES TRAITEMENTS PRIMAIRES	25
Coagulation Flocculation.....	25
La décantation.....	26
TRAITEMENTS BIOLOGIQUES	27
Les lits bactériens	27
Les boues activées	29
Les disques biologiques.....	30
Dispositions constructives	30
Le lagunage.....	31
Principe et Fonctionnement	31
CLARIFICATION ET REJET DES EFFLUENTS.....	32
TRAITEMENTS COMPLEMENTAIRES	32
CHAPITRE II. GENERALITE SUR LES MICROALGUES.....	33
DEFINITION ET CARACTERISTIQUES DES MICROALGUES.....	33
CROISSANCE DES MICROALGUES	34
CLASSIFICATION DES MICROALGUES	35
REPRODUCTION DES MICROALGUES	36

REPRODUCTION ASEXUEE.....	36
REPRODUCTION SEXUEE.....	37
CULTURE DES MICROALGUES	38
MILIEU DE CULTURE	38
LES CONDITIONS DE CULTURE	38
SYSTEME DE CULTURE	39
systèmes ouverts	39
systèmes fermés	40
Systèmes hybrides	41
LES PARAMETRES INFLUENÇANT LA CROISSANCE DES MICROALGUES.....	41
APPLICATIONS DES MICROALGUES.....	42
APPLICATION ALIMENTAIRES.....	43
APPLICATION PHARMACEUTIQUE.....	43
APPLICATION ENERGETIQUE.....	43
APPLICATION COSMETIQUE.....	43
AGROFOURNITURES ET TRAITEMENT DE L'EAU	44
CHAPITRE III. CULTURE DES MICROALGUES DANS LES EAUX USEES.....	46
III. 1. CULTURE DES MICROALGUES DANS LES EAUX USEES DE LA STATION DU KSAR DE M'RAGUEN ADRAR.....	46
III. 1. 1. SOUCHE ET CONDITIONS DE CULTURE	46
III. 1. 2. METHODES ANALYTIQUES	47
III. 1. 3. LA CROISSANCE DES MICROALGUES DANS LES EAUX USEES.....	52
III. 1. 4. ÉLIMINATION DES NUTRIMENTS DES EAUX USEES.....	52
III. 1. 4.1. Élimination d'ammonium.....	52
III. 1. 4.2. Élimination de phosphore.....	54
III. 1. 4.3. Elimination de DCO.....	55
III. 1. 4.4. Elimination de DBO ₅	57
CONCLUSION GENERALE.....	58
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	60
ANNEXE I.....	71

Liste des abréviations

CO ₂	Dioxyde de carbone
H ₂	hydrogène moléculaire
pH	potentiel hydrogène
PBR	photobioréacteur
EDTA	Éthylène Diamine Tétra-Acétique
MgSO ₄	Sulfate de magnésium
NaNO ₃	nitrate de sodium
K ₂ HPO ₄	hydrogénophosphate de potassium
CaCl ₂	chlorure de calcium
H ₃ BO ₃	acide borique
MnCl ₂	chlorure de manganèse
ZnSO ₄	sulfate de zinc
NaMoO ₄	molybdate de sodium
STEP	Station d'épuration
<i>C. pyrenoidosa</i>	<i>Chlorella pyrenoidosa</i>
PT	Phosphore total
DCO	Demande chimique en oxygène
MES	Matière en suspension
NaHCO ₃	bicarbonate de sodium
Na ₂ CO ₃	carbonate de sodium
CuSO ₄	sulfate de cuivre(II)

Liste des figures

Figure 1: La mort des poissons (Mohammed 2013).....	14
Figure 2: Phénomène d'eutrophisation (Adewale 2014).....	15
Figure 3: L'eutrophisation (cas des algues vertes) (Des et al. 2012)	16
Figure 4: la toxicité aigüe et la toxicité chronique (Dahdou-guebas et al. 2010).....	17
Figure 5: Voies de transmission des virus des gastro-entérites (Angers et al. 2015).....	18
Figure 6: De possibles perturbateurs endocriniens dans les lacs et rivières (Dahdou-guebas et al. 2010).....	19
Figure 7: schéma descriptif d'une station d'épuration (Briand 2008).....	20
Figure 8: dégrilleur (Bahlaoui et al. 2012)	23
Figure 9: déshuileur (Briand 2008)	24
Figure 10: dessableur (Angers et al. 2015).....	25
Figure 11: Coagulation floculation (Adewale 2014).....	26
Figure 12: décanteur (Des et al. 2012)	27
Figure 13: lit bactérien (C Boutin et al. 2017)	29
Figure 14: Station d'épuration à boues activées (Larsdotter 2006).....	30
Figure 15: disque biologique (Sirven 2006).....	31
Figure 16: Différentes formes de microalgues (Mohammed 2013).....	33
Figure 17: Les phases de croissance des microorganismes (Mohammed 2013).....	34
Figure 18: Arbre phylogénétique de classification des microalgues (Borowitzka 2016)	36
Figure 19: Exemple de reproduction sexuée et asexuée chez Chlamydomonas (Mata et al. 2010)	37
Figure 20: Raceways de Cyanotech Corp, Kona, Hawaii (Tan et al. 2015)	39
Figure 21: Photobioréacteur tubulaire de l'Université de Wageningen Algae Parc (Nil 2016).....	40
Figure 22: Diagramme des paramètres de croissance des microalgues (L. Yang et al. 2015).....	42
Figure 23: Diversité du champ d'application des microalgues (Becerra-Celis 2009)	42
Figure 24: Des applications variées dans des domaines clés (alimentation, pharmacie, cosmétiques) (Park et al. 2013)	44

Liste des tableaux

Tableau 1: caractéristiques des eaux usées brutes.....47

Introduction générale

Un approvisionnement adéquat en eau de bonne qualité est essentiel au développement continu de n'importe quelle société. Les données les plus récentes sur l'utilisation brute de l'eau indiquent que le prélèvement total d'eau croît de façon régulière. Les incertitudes que soulève l'avenir des ressources en eau accentuent ce défi en raison d'épisodes climatiques extrêmes et des changements du climat, d'une concurrence accrue pour l'accès à des ressources limitées en eau à l'échelle mondiale et d'une demande croissante pour ce qui est d'un meilleur contrôle de la pollution des eaux usées à l'appui d'une meilleure utilisation des eaux réceptrices.

La pollution ou la contamination de l'eau peut être définie comme la dégradation de celle-ci en modifiant ses propriétés physiques, chimiques et biologiques ; par des déversements, rejets, dépôts directs ou indirects de corps étrangers ou de matières indésirables telles que les microorganismes, les produits toxiques, les déchets industriels.

Au cours des dernières décennies, de grandes quantités d'eaux usées ont été produites, principalement en raison d'activités humaines, telles que les pratiques agricoles, l'urbanisation et l'industrialisation (Sonune et al. 2004; Aslan et al. 2006). L'élimination continue des eaux usées sans traitement adéquat peut poser de sérieux problèmes de pollution.

L'un des problèmes majeurs liés au rejet continu d'effluents dans les masses d'eau est le phénomène d'eutrophisation, l'enrichissement des ressources hydriques en nutriments, principalement en azote et en phosphore. Ce phénomène est responsable du développement des proliférations des algues, de la propagation des plantes aquatiques, de l'appauvrissement en oxygène et de la perte d'espèces clés, entraînant la dégradation complète des écosystèmes d'eau douce (Renuka et al. 2013; Ruiz et al. 2013). Cela démontre clairement la nécessité de méthodes de traitement efficaces, capables de réduire les concentrations d'azote et de phosphore en particulier dans les eaux usées avant de les déverser dans les milieux naturels.

les microalgues peuvent fournir plusieurs nutriments (vitamines,antioxydants, protéines hautement digestibles et acides gras essentiels). En plus des recherches ont été menées

dans ce domaine en créant des comprimés, des poudres, des liquides ou des aliments contenant des microalgues (*Spiruline* et *Chlorella*) parce qu'ils peuvent contribuer à améliorer la santé nutritionnelle (Plaza et al. 2008; Petracci et al. 2009). En effet, la première culture commerciale à grande échelle de *Chlorella* a débuté au Japon au début des années 1960 par Nihon (Spolaore et al. 2006), suivie d'une installation de récolte et de culture de la *Spiruline* au Mexique (début des années 1970) (Wang et al. 2014).

Oswald et al collègues de l'Université de Californie se sont concentrés sur la culture des microalgues à grande échelle pour la production de biomasse et pour le traitement des eaux usées (Oswald et al. 1960). À partir de ce moment, plusieurs bassins ont été construits pour réaliser des projets de recherche sur les microalgues. Par exemple, un bassin d'algues de traitement des eaux usées de 300 m² situé à Jérusalem a été conçu sur le modèle d'Oswald par Shelef et al. (1973).

À cette époque, il a été démontré que la sélection des souches en laboratoire n'était pas aussi productive que les souches cultivées spontanément dans les bassins (Sheehan et al. 1998). En outre, *Botryococcus braunii* a été découvert en tant que candidat pour la production d'hydrocarbures à longue chaîne, en raison de la forte présence de lipides, il a été comparé aux huiles fossiles être considéré comme une source de carburants renouvelables.

Dans le cadre de ce travail, nous nous sommes intéressés à étudier la culture de différentes souches microalgales dans les eaux usées domestiques provenant du Ksar de M'raguen Adrar, ainsi, l'évaluation des taux d'élimination des matières polluantes existant dans ces eaux usées. Ce travail est répartie en trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à une description générale sur la composition chimique et microbiologique des eaux usées. Ainsi, les procédés d'épuration des eaux usées. Le deuxième chapitre est une étude bibliographique qui donnera une aperçue générale sur les microalgues et sur le développement de leur culture au cours des années. Les systèmes de culture des microalgues et les éléments nutritifs nécessaires pour leur croissance ont été détaillés dans ce chapitre.

Ensuite, le troisième chapitre décrit les résultats de la culture de *C. pyrenoidosa* et *Chlorococcum* dans un système fermé où les eaux usées de la station d'épuration du Ksar de M'raguen sont utilisées comme un milieu de croissance.

Enfin, nous terminons notre étude par une conclusion générale où sont récapitulés les principaux résultats obtenus.

Chapitre I. Généralité les eaux usées

Les approvisionnements en eau du monde ont été contaminés en raison d'importants effluents contenant des polluants toxiques tels que des colorants, des métaux lourds, des tensioactifs, des produits de soins personnels, des pesticides et des produits pharmaceutiques provenant de ressources agricoles, industrielles et municipales dans les cours d'eau. La contamination de l'eau et son traitement sont devenus un défi croissant à l'échelle mondiale. Des efforts extraordinaires ont été déployés pour surmonter les défis du traitement des eaux usées ces dernières années.

Dans ce premier chapitre nous allons donner quelques généralités sur les eaux usées pour mieux comprendre leur composition chimique et microbiologique ainsi que les principaux processus d'épuration.

I. 1. Définition d'une eau usée

L'eau usée est la combinaison de liquides ou déchets transportés dans l'eau provenant de diverses sources y compris les zones résidentielles, l'industrie et les activités agricoles. Des concentrations élevées de la demande en oxygène, des matières organiques et inorganiques sont généralement associés avec les eaux usées (Sonune et al. 2004).

Les eaux usées sont considérées comme polluées et doivent être traitées avant tout rejet dans les milieux récepteurs pour résoudre les différents problèmes de la pollution de ces milieux.

I. 2. Sources, mécanismes et symptômes de la pollution des eaux

L'activité humaine, qu'elle soit industrielle (chimie, papeterie, industrie agroalimentaire, etc.), urbaine (usages domestiques, commerce, entretien des rues), ou agricole (utilisation d'engrais et de pesticides), produit quantité de substances polluantes de toute nature qui sont à l'origine de différents types de pollutions : des pollutions organiques (essentiellement d'origine animale), chimiques (fertilisants, pesticides, métaux, détergents...), biologiques (bactéries, virus et autres champignons), radioactives ou acides.

Ces polluants sont émis dans l'atmosphère, évacués dans les eaux usées ou épandus sur les sols, sous forme de gaz, de substances dissoutes ou de particules. La plupart finissent par rejoindre les milieux aquatiques.

I. 2. 1. Pollution physique

La pollution physique peut paraître anodine au regard des pollutions chimiques, compte tenu de la toxicité et des effets à long terme de certaines molécules. Pourtant, cette pollution physique peut être tout autant nocif, c'est le cas de:

I. 2.1.1. Pollution thermique

La pollution thermique peut avoir des effets locaux importants, en particulier sur les écosystèmes aquatiques. C'est une modification de la température du milieu, le plus souvent à la hausse. En général, ce type de pollution est causé par les mécanismes de roidissement des industries et centrales énergétiques qui se traduisent par des rejets d'eau chaude dans l'environnement (Hena et al. 2018). Toutefois, les rejets d'eau usée urbaine et les drainages agricoles peuvent aussi être responsables d'une élévation de la température des eaux. L'élévation de température d'un milieu a deux effets notables :

- Réduction de la quantité d'oxygène dissous dans les milieux aquatiques ;
- Augmentation de l'activité métabolique des organismes (jusqu'à un certain seuil) et donc leur consommation en oxygène.

-Il semble aussi que l'augmentation de la température accroisse la sensibilité des organismes aux substances toxiques.

I. 2.1.2. Pollution radioactive

Parmi les différents types de pollution du milieu, la pollution radioactive est incontestablement celle qui est la plus mal connue, et cependant c'est aussi celle qui a suscité les mesures de protection à la fois les plus sévères et les plus scientifiquement établies. Certes, la pollution radioactive a ses propres caractéristiques, mais du point de vue de l'homme et de l'écologie, c'est une pollution parmi les autres et les risques qui en résultent devraient être évalués sur les mêmes bases (Kalle 1963).

Pour des raisons de commodité et aussi par mesure d'économie, beaucoup d'établissements industriels se débarrassent de leurs déchets en les rejetant dans le milieu ambiant, le plus souvent d'ailleurs sur les lieux mêmes ou à proximité du lieu de production. Les effluents gazeux et les aérosols sont rejetés dans l'atmosphère, les effluents liquides dans le sol, dans les rivières ou dans la mer. Quant aux déchets solides, le plus souvent ils sont déposés sur le sol.

Pollution chimique

Peut-être chronique, accidentelle ou diffuse. Le risque chimique est lié à la présence de constituants géologiques ou de contaminants issus des activités humaines (aménagement, industrie, agriculture). L'utilisation excessive d'engrais pour l'agriculture et l'élevage apporte une présence d'azote et de phosphore en quantité excessive dans les cours d'eau. Les algues de surface prolifèrent rapidement entraînant une diminution de la luminosité et surtout une consommation importante d'oxygène dissous dans l'eau ; c'est le phénomène d'eutrophisation (Bendida et al. 2013). L'oxygène n'est alors plus en quantité suffisante pour les organismes supérieurs.

Pollution biologique

L'eau peut contenir des micro-organismes pathogènes tels que les bactéries comme (*Salmonella*), les virus (hépatite A) et les protozoaires (*Toxoplasma*, *Cryptosporidium*).

La pollution microbiologique a souvent pour source des eaux usées improprement traitées ou des eaux de ruissellement provenant d'installations d'élevage et se déversant dans les cours d'eau. Des épidémies peuvent émerger et limiter les usages que l'on peut faire de l'eau. Par exemple, à Milwaukee, en 1993 (Etats Unie), plus de 400 000 personnes ont souffert de symptômes gastro-intestinaux après avoir été en contact avec de l'eau potable contaminée par le protozoaire *Cryptosporidium* (Parlanti et al. 2000) .

Dans le monde, environ 2,3 milliards de personnes souffrent de maladies liées à l'eau Ces maladies sont variées. Il y a :

- les maladies d'origine hydrique (causées par les organismes fécaux oraux et des substances toxiques, ... Plus de 12 millions de personnes meurent chaque année de maladies hydriques dans le monde, 1,8 million d'enfants meurent chaque année de diarrhées et de maladies véhiculées par l'eau non potable) ;
- les maladies à support hydrique (transmises par les vecteurs liés à l'eau) ;

I. 2. 4. Pollution organique

Cette forme de pollution constitue la fraction la plus importante. En effet, elle résulte de l'introduction dans le milieu de substances organiques provenant de diverses activités : Industrielles (hydrocarbures), agricoles (engrais azotés et phosphatés) et domestiques (phosphates, matières fermentescibles). La pollution organique de l'eau provenant des eaux domestiques et des industries agroalimentaires provoque une surconsommation de l'oxygène nécessaire à la dégradation de la matière organique et peut entraîner par conséquent la mort de la vie aquatique (Xu et al. 2018).

Origine des eaux usées

D'après Rodier et al,(Rodier et al. 2005) ,elles peuvent classer comme eaux usées, les eaux d'origine urbaines constituées par des eaux ménagères (lavage corporel et du linge, lavage des locaux, eaux de cuisine) et les eaux vannes chargées de fèces et d'urines ; toute cette masse d'effluents est plus ou moins diluée par les eaux de lavage de la voirie et les eaux pluviales. Peuvent s'y ajouter suivant les cas les eaux d'origine industrielle et agricole. Suivant l'origine des substances polluantes, ces eaux sont classées en quatre grandes catégories :

Origine domestique

Les effluents domestiques sont un mélange d'eaux contenant des déjections humaines : urines, fèces (eaux vannes) et eaux de toilette et de nettoyage des sols et des aliments (eaux ménagères). Ces eaux sont généralement constituées de matières organiques dégradables et de matières minérales, ces substances sont sous forme dissoute ou en suspension. Elles se composent essentiellement par des eaux de vanne d'évacuation de toilette et des eaux ménagères d'évacuation des cuisines, salles de bains (Loucif et al. 2020). Elles proviennent essentiellement :

- Des eaux de cuisine qui contiennent des matières minérales en suspension provenant du lavage des légumes, des substances alimentaires à base de matières organiques (glucides, lipides, protides) et des produits détergents utilisés pour le lavage de la vaisselle et ayant pour effet la solubilisation des graisses ;
- Des eaux de buanderie contenant principalement des détergents
- Des eaux de salle de bain chargées en produits utilisés pour l'hygiène corporelle, généralement des matières grasses hydrocarbonées ;
- Des eaux de vannes qui proviennent des sanitaires, très chargées en matières organiques hydrocarbonées, en composés azotés, phosphatés et microorganisme

I.3.2. Origine industrielles

Elles contiennent également des matières organiques, azotées et phosphorées comme les eaux domestiques, mais elles sont très différentes, car leurs caractéristiques varient d'une industrie à l'autre. Elles peuvent également contenir :

- des graisses qui proviennent des industries agroalimentaires et d'équarrissage
- des hydrocarbures provenant des raffineries
- des métaux (métallurgie)
- des acides, des bases et divers produits chimiques
- des matières radioactives (centrales nucléaires, traitement des déchets radioactifs)

Généralement, avant d'être rejetées dans les réseaux de collecte, les eaux industrielles doivent faire l'objet d'un prétraitement de la part des industriels. Elles ne sont mêlées aux eaux domestiques que lorsqu'elles ne présentent plus de danger pour les réseaux de collecte et ne perturbent pas le fonctionnement des usines de dépollution (Tarmoul 2007).

Origine agricoles

Ce sont des eaux de drainage et des rejets de fermes. Ces eaux sont caractérisées par la présence de fortes concentrations de pesticides et d'engrais, elles ont une valeur fertilisante très importante (Kellogg et al. 2000).

Origine pluviales

Elles sont issues du ruissellement de l'eau de pluie. Ces eaux pluviales ne sont pas forcément polluées, mais peuvent constituer une source de pollution importante des cours d'eau. Les eaux de pluie englobent les impuretés de l'air (gaz polluants rejetés par les industries...) et ruissellent sur des surfaces terrestres contenant des résidus d'hydrocarbure, de métaux lourds, d'huiles, ... Lorsque le système d'assainissement est dit "unitaire", les eaux pluviales sont mêlées aux eaux usées domestiques. En cas de fortes précipitations, les contraintes de préservation des installations d'épuration peuvent imposer un déversement de ce mélange très pollué dans le milieu naturel (Diagne et al. 2017).

I. 4. Composition des eaux usées

La composition des eaux usées est extrêmement variable en fonction de leur origine (Industrielle, domestique, etc). Elles peuvent contenir de nombreuses substances, sous forme solide ou dissoute, ainsi que de nombreux micro-organismes. En fonction de leurs caractéristiques physiques, chimiques, biologiques et du danger sanitaire qu'elles représentent, ces substances peuvent être classées en quatre groupes: les microorganismes, les matières en suspension, les éléments traces minéraux ou organiques, et les substances nutritives (Jayakumar et al. 2017; Logroño et al. 2017).

I. 4. 1. Microorganismes

Les eaux usées contiennent tous les microorganismes excrétés avec les matières fécales. L'ensemble de ces organismes peut être classé en quatre grands groupes: les bactéries, les virus, les protozoaires et les helminthes (Koprivanac et al. 2009).

I. 4. 1. 1. Les bactéries

Les bactéries sont des organismes unicellulaires simples et sans noyau. Leur taille est comprise entre 0,1 et 10 μm . Les bactéries sont les microorganismes les plus communément rencontrés dans les eaux usées. Parmi les bactéries les plus détectées sont les salmonelles, dont celles responsables de la typhoïde, des paratyphoïdes et des troubles

intestinaux. Ainsi que les coliformes thermotolérants sont des germes témoins de contamination fécale communément utilisés pour contrôler la qualité relative d'une eau (Toze 1999).

I. 4. 1. 2. Les virus

Ce sont des organismes infectieux de très petite taille (10 à 350 nm) qui se reproduisent en infectant un organisme hôte. Les virus ne sont pas naturellement présents dans l'intestin, contrairement aux bactéries.

Ils sont présents soit intentionnellement (après une vaccination contre la poliomyélite, par exemple), soit chez un individu infecté accidentellement (Asano et al. 1996). Leur isolement et leur dénombrement dans les eaux usées restent difficiles, ce qui conduit vraisemblablement à une sous-estimation de leur nombre réel.

Cependant, les virus entériques sont ceux qui se multiplient dans le trajet intestinal. Parmi les virus entériques humains les plus nombreux, nous citerons les entérovirus (exemple : *polio*), les rotavirus, les rétrovirus, les adénovirus et le virus de l'Hépatite A. Il semble que les virus soient plus résistants dans l'environnement que les bactéries (Aulicino et al. 1996).

I. 4. 1. 3. Les protozoaires

Les protozoaires sont des organismes unicellulaires. La plupart des protozoaires pathogènes sont des organismes parasites, c'est-à-dire qu'ils se développent aux dépens de leur hôte. Certains protozoaires adopte au cours de leur cycle vital une forme de résistance, appelée kyste qui peut être véhiculé par les eaux résiduaires. Cette forme peut résister généralement aux procédés de traitements des eaux usées (Campos 2008).

I. 4. 1. 4. Les helminthes

Les helminthes sont majoritairement des organismes parasites rencontrés dans les eaux résiduaires. En effet, la persistance de ces organismes à différentes conditions environnementales ainsi que leur résistance à la désinfection permet leur reproduction, ce qui constitue leur risque potentiel (Campos 2008).

Les helminthes pathogènes rencontrés dans les eaux usées sont: *Ascaris lumbricades*, *Oxyuris vermicularis*, *Trichuris trichuria*, *Taenia saginata*.

I. 4. 2. Les matières en suspension (MES)

Ce sont des matières biodégradables pour la plupart. Les micro-organismes sont le plus souvent adsorbés à leur surface et sont ainsi transportés par les MES. Elles donnent également à l'eau une apparence trouble, une mauvaise odeur.

Pendant, elles peuvent avoir un intérêt pour l'irrigation des cultures. Les particules en suspension peuvent, par définition, être éliminées par décantation. C'est une étape simple et efficace pour réduire la charge organique et la teneur en germes pathogènes des eaux usées. Toutefois, un traitement beaucoup plus poussé est généralement requis pour faire face aux risques sanitaires (Mehanned et al. 2014).

I. 4. 3. Les éléments traces, minéraux ou organiques

Les micro-polluants organiques et non organiques résultent d'une pollution multiple et complexe. Les micropolluants sont des éléments présents en quantité infinitésimale dans les eaux usées. La voie de contamination principale, dans le cas d'une réutilisation des eaux usées épurées, est l'ingestion (Jayakumar et al. 2017). C'est la contamination par voie indirecte qui est généralement préoccupante.

Certains micropolluants, comme les métaux lourds ou les pesticides, peuvent s'accumuler dans les tissus des êtres vivants, et notamment dans les plantes cultivées. Il peut donc y avoir une contamination de la chaîne alimentaire et une concentration de ces polluants dans les organismes (Yang et al. 2009).

I. 4. 3. 1. Les métaux lourds

Les métaux lourds que l'on trouve dans les eaux usées urbaines sont extrêmement nombreux (de l'ordre de quelques µg/l). Les plus abondants sont le fer, le zinc, le cuivre et le plomb. Les autres métaux (manganèse, aluminium, chrome, arsenic, sélénium, mercure, cadmium, molybdène, nickel, etc) sont présents à l'état de traces.

Leur origine est multiple: ils proviennent des produits consommés au sens large par la population, de la corrosion des matériaux des réseaux de distribution d'eau et d'assainissement, des eaux pluviales dans le cas de réseau unitaire, des activités de service (santé, automobile) et éventuellement de rejets industriels (Kligerman et al. 2015). Les éléments cités dans la littérature comme étant les plus dangereux sont le plomb (Pb), l'arsenic (As), le mercure (Hg), le cadmium (Cd) et le nickel (Ni) (Gupta et al. 2008).

I. 4. 3. 2. Les éléments toxiques organiques

Les micros-polluants d'origine organique sont extrêmement nombreux et variés, ce qui rend difficile l'appréciation de leur dangerosité. Ils proviennent de l'utilisation domestique, des rejets industriels et des eaux de ruissellement sur les terres agricoles (Andreozi et al. 2003). Parmi ces composés chimiques toxiques très persistants et qui ont une grande lipophilicité, on peut citer les hydrocarbures polycycliques aromatiques, les alkylphénols, chlorophénols, phtalates, les pesticides et les résidus pharmaceutiques actifs (Kimura et al. 2004).

I. 4. 4. Les substances nutritives

Les nutriments se trouvent en grande quantité dans l'eau usée, et constituent un paramètre de qualité important pour la valorisation de ces eaux en agriculture et en gestion des paysages. Les éléments les plus fréquents dans les eaux usées sont l'azote, le phosphore et parfois le potassium, le zinc, le bore et le soufre. Ces éléments se trouvent en quantités appréciables, mais en proportion très variables que ce soit, dans les eaux usées épurées ou brutes (Hamoda 2004).

Mesure de la qualité des eaux

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

Paramètres organoleptiques

Il s'agit de la saveur, de la couleur, de l'odeur et de la transparence de l'eau (turbidité). Ils n'ont pas de signification sanitaire mais, par leur dégradation, peuvent constituer des facteurs d'alerte pour une pollution ou un mauvais fonctionnement des installations de traitement ou de distribution (Yapo et al. 2009).

Paramètres physico-chimiques

Température de l'eau, pH, Conductivité électrique, MES (matières en suspension), Dureté totale, Alcalinité, Equilibre calco-carbonique, Chlorures, Sodium, Potassium, Sulfates (Diagne et al. 2017).

Paramètres indésirables

Fer, Aluminium, Cuivre, Manganèse, Zinc (Bengherbia et al. 2014).

Paramètres de toxicité

Arsenic, Cadmium, Plomb, Mercure, Chrome (Karen et al. 2018).

Paramètres organiques

Demande biochimique en oxygènes (DBO₅), Demande chimique en oxygène (DCO), Phosphate, Azote ammoniacal, Nitrates, Nitrites (Lucas et al. 2012).

Paramètres bactériologiques

Coliformes totaux, Coliformes fécaux, Streptocoques fécaux, Clostridies sulfito-réductrices (Loucif et al. 2020).

Influence de la pollution sur les êtres vivants et l'environnement

Les conséquences de la pollution des milieux aquatiques sont multiples. Elles conduisent à des mortalités massives d'espèces, mais elles ont aussi des effets moins visibles : une eutrophisation des milieux, des effets toxiques à plus ou moins long terme, des maladies ou des perturbations endocriniennes (VIVIER 1970).

I.6. 1. Les mortalités liées aux altérations de la physico-chimie

Les altérations physico-chimiques sont des modifications des caractéristiques des milieux, comme la salinité, l'acidité ou la température de l'eau. Passé un certain seuil, ces modifications deviennent toxiques pour les organismes vivant dans le milieu. Parmi tous les paramètres qui constituent la physico-chimie, l'oxygène est particulièrement déterminant pour la faune et la flore. Une quantité d'oxygène dissous trop faible pour assurer la vie des êtres vivants est qualifiée d'hypoxie. L'anoxie est le stade ultime, où il n'y a plus d'oxygène dissous dans l'eau. Les épisodes d'hypoxie peuvent être la conséquence d'un apport trop important de matières organiques. Celles-ci sont dégradées par les bactéries du milieu, qui consomment l'oxygène dissous dans l'eau lors de ce processus. Toutefois, l'hypoxie peut avoir d'autres origines : augmentation de la température de l'eau (l'oxygène étant moins soluble dans l'eau chaude), stagnation de l'eau, rejet d'eau désoxygénée, eutrophisation etc (Leclercq 2016).

Les phénomènes d'hypoxie et d'anoxie ont de lourds impacts sur la biodiversité, essentiellement du fait des épisodes de mortalités qu'ils provoquent. Les poissons sont particulièrement touchés, mais globalement tous les animaux et les plantes pâtissent d'un manque d'oxygène.

De nombreux autres paramètres physico-chimiques sont déterminants : par exemple, de nombreux organismes d'eau douce (poissons, amphibiens, etc.) ne sont pas capables de survivre à une salinité supérieure à 3 grammes de sel par litre d'eau.



Figure 1: La mort des poissons (Mohammed 2013)

Tous les usages de l'eau et des milieux qui dépendent du vivant peuvent être impactés par les altérations physico-chimiques si elles conduisent à des mortalités : la pisciculture, la conchyliculture, la pêche professionnelle comme la pêche de loisir, etc.

I.6. 2. L'eutrophisation des milieux

L'eutrophisation est l'ensemble des symptômes que présente un écosystème aquatique à la suite d'un apport excessif de nutriments - en particulier le phosphore et l'azote - d'origine humaine. L'apport de substances qui contiennent ces nutriments - comme par exemple les nitrates et les phosphates - stimule fortement la croissance des organismes végétaux, entraînant le développement soudain de plantes ou d'algues, qualifié de "prolifération végétale". Ce phénomène est accentué par les températures élevées, l'abondance de lumière et le faible renouvellement de l'eau (Pinay et al. 2018).



Figure 2: Phénomène d'eutrophisation (Adewale 2014)

Les proliférations végétales impactent les milieux et leur biodiversité. Elles entraînent une augmentation de la consommation d'oxygène, notamment la nuit (par la respiration des végétaux) ou lorsque des grands volumes de plantes se décomposent. Des mortalités soudaines d'organismes vivants peuvent alors se produire à cause d'un manque d'oxygène. L'eutrophisation peut aussi avoir des conséquences sur la santé : certaines espèces d'algues proliférantes produisent des toxines dangereuses, et peuvent par exemple

nécessiter l'interdiction de la baignade en cas de prolifération (cas des cyanobactéries). De plus, la décomposition de volumes importants de plantes mortes produit des gaz toxiques : c'est un phénomène régulièrement observé sur les plages des eaux côtières victimes de l'eutrophisation (cas des algues vertes).



Figure 3: L'eutrophisation (cas des algues vertes) (Des et al. 2012)

Enfin, ce phénomène peut impacter de nombreux autres usages : les proliférations végétales peuvent rendre impossible l'accès aux milieux, contraignant la pratique de la navigation par exemple. Elles peuvent obstruer le matériel utilisé pour les prélèvements d'eau. Les risques toxiques liées aux proliférations peuvent aussi impacter la pisciculture ou l'élevage, lorsqu'ils provoquent des mortalités d'animaux (Castillon 2005).

3. Des effets toxiques sur les êtres vivants

À partir d'une certaine dose, les substances polluantes ont un effet toxique sur les êtres vivants. Cela signifie que, lorsqu'elles pénètrent dans l'organisme (essentiellement par ingestion, mais parfois par respiration), elles sont néfastes à sa survie ou sa santé. Une distinction est faite entre la toxicité aiguë et la toxicité chronique (Margot et al. 2011). La toxicité aiguë est la réaction soudaine de l'organisme à une quantité importante d'une substance toxique. Elle peut entraîner la mortalité partielle ou totale des différents êtres

vivants dans le milieu pollué. Parfois, elle ne provoque pas de mortalité mais réduit fortement la capacité des organismes à survivre à une autre perturbation.

La toxicité chronique est la réaction d'un organisme exposé sur une longue période à de petites quantités de substances polluantes. Elle fait suite à la présence régulière (voire permanente) de ces substances en faible concentration dans l'eau. Elle peut provoquer des maladies, des déficiences physiologiques (le dysfonctionnement d'un organe par exemple), mais peut aussi affecter la reproduction (Gassara et al. 2011).

En outre, certains polluants ne sont pas biodégradables et s'accumulent tout au long de la chaîne alimentaire. Pour ces substances, même si elles se trouvent en petites quantités dans le milieu, sans conséquences sur les organismes, des effets toxiques peuvent s'observer chez les espèces prédatrices situées en haut de la chaîne alimentaire.

La santé humaine peut ainsi être menacée en cas d'ingestion d'eau polluée. Toutefois, les traitements de potabilisation visent à éviter ce risque, en éliminant les substances toxiques de l'eau potable. Si la pollution de l'eau est trop forte, il est néanmoins parfois impossible de respecter les normes de potabilisation en dépit des traitements : l'eau ne peut alors pas être distribuée (Rifai 2013).

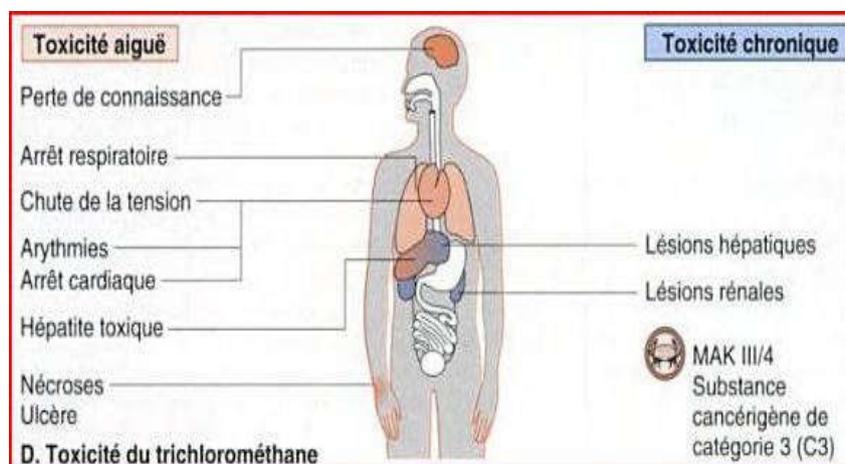


Figure 4: la toxicité aiguë et la toxicité chronique (Dahdou-guebas et al. 2010)

La contamination microbiologique des êtres vivants

Une contamination microbiologique correspond à la présence dans l'eau de bactéries, de parasites ou de virus pathogènes, c'est-à-dire capables de provoquer des maladies. Essentiellement d'origine fécale, leur présence dans l'eau est principalement liée au rejet

d'eaux usées insuffisamment épurées dans le milieu. D'autres types de microbes peuvent aussi être transmis par la présence de cadavres d'animaux - dans un ruisseau par exemple. Dans les milieux stagnants, comme les plans d'eau, existent aussi des cyanobactéries : ces algues microscopiques ne transmettent pas de maladies, mais elles peuvent produire des toxines potentiellement mortelles (Hadji Feyrouz 2020).

Les organismes pathogènes transmis par l'eau provoquent généralement des diarrhées et des gastro-entérites, mais parfois des maladies dangereuses comme le choléra ou la salmonellose. La transmission à l'homme se fait par ingestion (lors de l'alimentation ou d'une baignade) ou à travers des blessures de la peau en contact avec de l'eau contaminée. Elle peut aussi intervenir en cas de consommation de coquillages - comme les moules ou les huîtres - qui concentrent les microorganismes dans leur chair. La surveillance de la qualité de l'eau destinée à l'alimentation en eau potable ou à la baignade permet heureusement de limiter fortement les transmissions à l'homme (Saida et al. 2019).

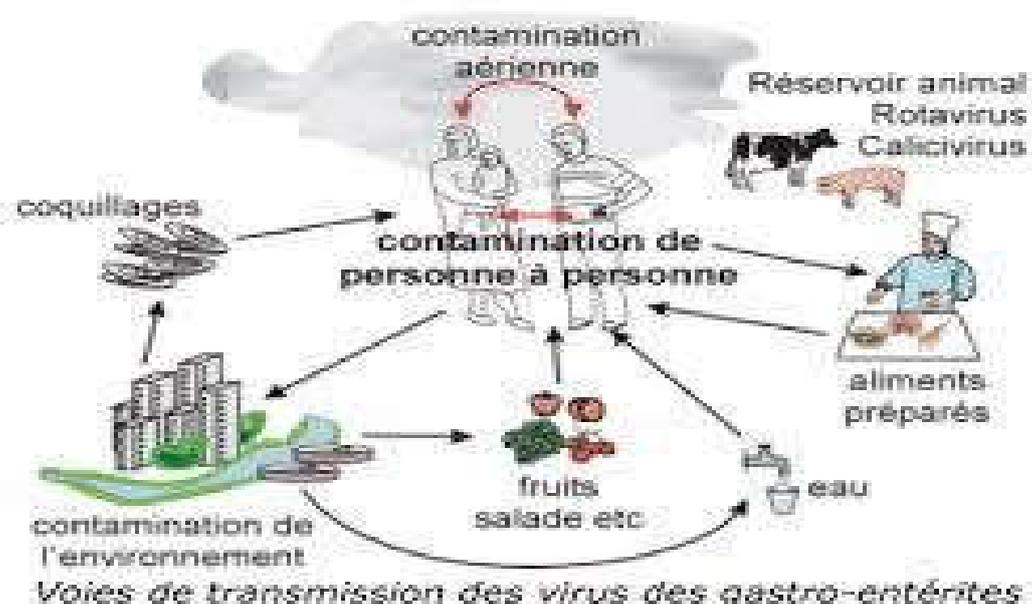


Figure 5: Voies de transmission des virus des gastro-entérites (Angers et al. 2015)

Les perturbations endocriniennes

Certaines substances sont capables d'interagir avec le système hormonal, en particulier les fonctions reproductrices ou le métabolisme. En effet, leur structure moléculaire est

suffisamment proche de certaines hormones naturelles - la testostérone par exemple - pour perturber le fonctionnement naturel du système hormonal. Ainsi, l'effet de ces polluants n'est pas directement toxique mais provoque des modifications d'ordre physiologique, appelées perturbations endocriniennes (Samira et al. 2020). Par ailleurs, ces substances peuvent avoir un effet même à de très faibles doses, comme les micropolluants. Elles sont susceptibles d'avoir des effets différents, ou renforcés, lorsqu'elles sont en mélange.

Dans la mesure où les systèmes hormonaux existent chez les animaux comme chez les végétaux, les perturbations endocriniennes peuvent affecter toute la biodiversité des milieux. Les conséquences peuvent être très variées, mais conduisent globalement à un déclin des populations. Par exemple, le tributylétain (biocide contenu dans les peintures des coques de bateaux) a été interdit parce qu'il provoque chez certains mollusques une masculinisation des femelles (croissance des organes reproducteurs mâles), les rendant stériles (Moilleron et al. 2020).



Figure 6: De possibles perturbateurs endocriniens dans les lacs et rivières (Dahdou-guebas et al. 2010)

Traitement des eaux usées

La station d'épuration est une installation destinée à épurer les eaux usées avant le rejet dans le milieu naturel. Le but du traitement est de séparer l'eau des substances indésirables pour le milieu récepteur.

Une station d'épuration est généralement installée à l'extrémité d'un réseau de collecte. Elle est constituée d'une succession de dispositifs, conçus pour extraire en différentes étapes les différents polluants contenus dans les eaux (Dudkowski 2000).

La taille, le type et la succession des dispositifs est calculée en fonction de la nature des eaux usées recueillies sur le réseau et des types de pollutions à traiter. La pollution retenue dans la station d'épuration est transformée sous forme de boues.

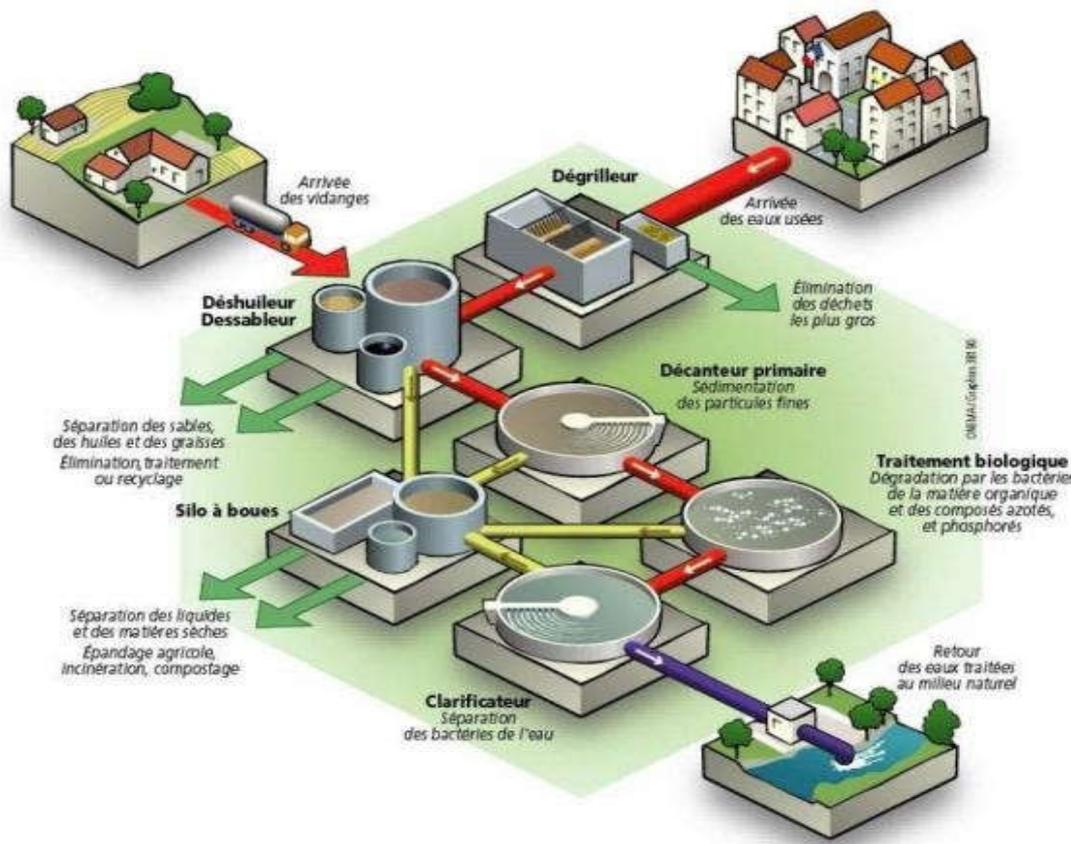


Figure 7: schéma descriptif d'une station d'épuration (Briand 2008)

Les prétraitements

Ils comprennent classiquement les dégrilleurs, les dessableurs et les déshuileurs. L'étape de prétraitement vise à éliminer les fractions les plus grossières contenues dans les effluents résiduaux. De nombreux équipements utilisés pour l'épuration des eaux sont

également très fréquemment employés pour protéger les équipements disposés sur le réseau d'assainissement.

Dégrillage

Il permet de filtrer les objets ou les détritrus les plus grossiers véhiculés par les eaux usées. Son principe consiste à faire passer l'eau brute à travers des grilles composées de barreaux placés verticalement ou inclinés de 60° à 80° sur l'horizontal. Le choix d'espacement des barreaux de la grille est défini par la taille et la nature des déchets acceptés par la STEP.

Au cours du dégrillage, les eaux usées passent au travers d'une grille dont les barreaux, plus ou moins espacés, retiennent les matières les plus volumineuses charriées par l'eau brute, qui pourraient nuire à l'efficacité des traitements suivants ou en compliquer leur exécution.

Le dégrillage permet aussi de protéger la station contre l'arrivée intempestive des gros objets susceptibles de provoquer des bouchages dans les différentes unités de l'installation.

Le dégrillage n'a aucune action sur la pollution associée à des particules de taille inférieure à la maille utilisée. Le dégrillage exige un entretien régulier et aussi une bonne gestion des déchets. Le dégrillage est classé en trois catégories selon l'écartement entre barreaux de grille (Le Hyaric 2009) :

- le prédégrillage : pour un écartement supérieur à 40 mm.
- le dégrillage moyen : pour un écartement de 10 à 40 mm.
- le dégrillage fin : pour un écartement inférieur à 10 mm.

Une fois les déchets stoppés par la grille, il faut les remonter :

- soit manuellement, ce qui est de plus en plus rare.
- soit mécaniquement à l'aide d'un peigne. Celui-ci remonte le long de la grille emmenant avec lui les déchets qui vont se déverser dans un réceptacle placé derrière la grille.

Les différents types de grilles et leur dimensionnement

La vitesse de passage à travers la grille doit être suffisante pour obtenir l'application des matières sur la grille, sans provoquer une perte de charge trop importante, ni entraîner un colmatage en profondeur des barreaux ou un départ des matières avec le flot. Ces vitesses n'étant pas très élevées, il faudra surveiller la formation de dépôts en amont de la grille et prévoir un système d'évacuation (brassage ou curage). Il existe trois types principaux de grille (Mraovic et al. 2016) :

a- Grilles manuelles

Elles sont généralement inclinées de 60 à 80° sur l'horizontale et composées de barreaux droits, ronds ou rectangulaires.

b-Grilles mécaniques à nettoyage par l'amont

Les barreaux sont généralement de section rectangulaire ou trapézoïdale. L'évacuation des déchets est située à l'aval de la grille. Il en existe 3 types :

-Grilles courbes

Elles sont conseillées pour les installations de moyenne importance avec des eaux pas trop chargées. Le nettoyage se fait à l'aide de deux peignes montés sur un bras tournant autour d'un axe horizontal.

-Grilles droites à nettoyage alternatif

Le champ de grille est souvent incliné à 80 degrés sur l'horizontale et le nettoyage se fait avec un racleur (ou râteau ou peigne ou poche pivotante) qui remonte les déchets le long de la grille et est redescend en position écarté du champ de grille.

-Grilles droites à nettoyage continu

Elles sont bien adaptées à un dégrillage fin avec risques de et feutrage (obturation de la grille par des feuilles par exemple). Elles sont inclinées à 80 degrés et l'éjection des déchets du réceptacle et motorisées.

c-Grilles mécaniques à nettoyage par l'aval

C'est un système de prédégrillage avec une capacité d'extraction importante (mais risques de rechute des déchets dans l'eau aval).

Surface de grille

Cette surface S est déterminée par la formule suivante :

$$S = Q_{max} \cdot V \cdot O \cdot C$$

Q_{max} : le débit maximum arrivant en entrée de grille .

V : la vitesse de l'influent qui est une vitesse permettant la bonne élimination des résidus et qui évite également une sédimentation de la grille.

O : grandeur relative au rapport espace libre entre les barreaux noté e et la somme de l'espace libre entre les barreaux et leur épaisseur notée E .

C : un coefficient de colmatage de grille.



Figure 8: dégrilleur (Bahlaoui et al. 2012)

Déshuilage dégraissage

Le déshuilage est une extraction liquide-liquide tandis que le dégraissage est une extraction solide-liquide. On peut considérer que le déshuilage dégraissage se rapporte à l'extraction de toutes matières flottantes d'une densité inférieure à celle de l'eau. Ces matières sont de nature très diverses (huiles, hydrocarbures, graisses...).

Elles peuvent former une émulsion stable entretenue par le brassage de l'eau ou constituer une phase indépendante non émulsionnée. Le déshuilage complet nécessite en fait un traitement en deux stades (Radhia 2016):

a-Prédéshuilage : par opération physique gravitaire sans adjonction de réactifs, il s'effectue par flottation naturelle des vésicules huileuses émulsionnées. Si l'émulsion n'est pas trop fine (particules supérieures à $50\mu\text{m}$), il est réalisé dans différents types d'appareils: déshuileurs longitudinaux conventionnels, à plaques parallèles et circulaires raclés.

b-Déshuilage final: flottation par air dissous où les bulles d'air augmentent la vitesse de remontée des particules grasses et des huiles lorsqu'elles ne sont pas émulsionnées, ou coagulation par sels métalliques ou par électrolytes permettant d'obtenir l'épuration complète.



Figure 9: déshuileur (Briand 2008)

Dessablage

Toute eau usée transporte des sables en suspension. La quantité de sable arrivant en station est fonction du type de réseau, séparatif ou non, vieux ou neuf... Le sable peut détériorer les appareillages ou induire une usure prématurée. Plus la station est mécanisée, plus les dégâts sont importants! En plus des dégâts, ils peuvent provoquer des perturbations en occupant un volume dans le digesteur ou accroître le colmatage des lits bactériens. On l'installe généralement après le dégrillage ou le tamisage. On considère 2 grands types de dessableur (Cruz et al. 2016):

a- Longitudinal.

b-Tangentiel.



Figure 10: dessableur (Angers et al. 2015)

Les traitements primaires

Les traitements primaires regroupent les procédés physiques ou physico-chimiques visant à éliminer par décantation une forte proportion de matières minérales ou organiques en suspension (Vanrolleghem et al. 2014).

L'élimination des matières en suspension présentes dans le milieu liquide est réalisée par sédimentation, en utilisant uniquement les forces de gravité. On utilise cette opération pour :

- capter une quantité importante de pollution organique.
- Réduire le risque de colmatage du système de traitement biologique.

Coagulation Flocculation

L'opération de coagulation-flocculation a pour but la croissance des particules (qui sont essentiellement colloïdales) par leur déstabilisation puis formation de flocs par absorption et agrégation (Khalil et al. 2015), le schéma qui illustre ce phénomène est présenté sur la Fig.11. Les flocs ainsi formés seront décantés et filtrés par la suite.

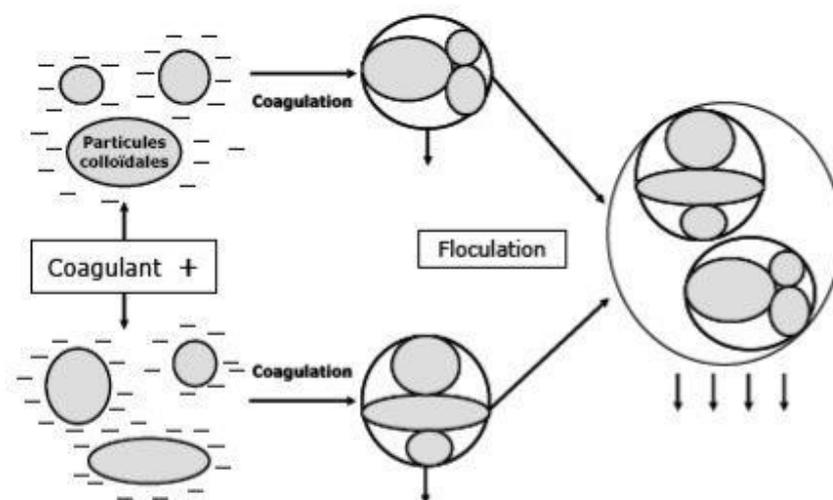


Figure 11: Coagulation flocculation (Adewale 2014)

La décantation

La décantation, procédé qu'on utilise dans pratiquement toutes les usines d'épuration et de traitement des eaux, a pour but d'éliminer les particules en suspension dont la densité est supérieure à celle de l'eau. Ces particules s'accumulent au fond du bassin, d'où on les extrait périodiquement. L'eau récoltée en surface est dite clarifiée (Rocher et al. 2011).

Si on laisse reposer une suspension solide dans une phase liquide, on observe que les particules sous l'action de la pesanteur et de la poussée d'Archimède, tendent à tomber vers le fond ou à remonter à la surface selon leur densité et leur taille. Cette décantation peut cependant être relativement lente pour les très fines particules (sensibles à l'agitation thermique) et les liquides particulièrement visqueux (Chaouki et al. 2015). Toutefois, il est possible d'agir sur plusieurs paramètres pour augmenter la vitesse de sédimentation : le diamètre des particules, en utilisant des flocculants

- la différence de densité
- la viscosité du fluide, qui diminue avec l'élévation de la température



Figure 12: décanteur (Des et al. 2012)

Traitements biologiques

Les prétraitements physiques permettent d'éliminer les fractions solides grossières des eaux usées, sans action sur la partie non décantable. Les traitements physicochimiques permettent, en plus, d'éliminer une partie de la fraction soluble. Mais seuls les traitements biologiques permettent, de façon acceptable sur le plan économique, d'éliminer de façon très poussée la fraction soluble et organique de la pollution. En effet, les bactéries (agent biologique le plus fréquemment employé), en raison de leur taille très réduite (et de leur capacité d'échange membranaire), de leur forte densité, de leur capacité d'adaptation (forte capacité de dissémination en général) et de leur fort taux de développement, sont les plus capables d'épurer efficacement les eaux usées (Ayed et al. 2009).

Néanmoins, pour assurer un fonctionnement efficace de l'étage biologique avec ses équipements (agitateurs, pompes, aérateurs...), il est le plus souvent impératif de placer des équipements de prétraitement en amont qui assurent ainsi une fonction de protection. Il existe de très nombreux procédés permettant de dégrader la matière organique par voie biologique. On distingue :

Les lits bactériens

Cette technique consiste à faire supporter les micro-organismes épurateurs par des matériaux poreux ou caverneux. L'eau à traiter est dispersée en tête de réacteur et traverse

le garnissage et peut être reprise pour une recirculation.

La surface d'encombrement au sol est limitée, et le coût en énergie peu élevé. Néanmoins, elle nécessite des volumes réactionnels importants et entraîne l'émanation d'odeurs.

Dans les lits bactériens (ou filtres bactériens), la masse active des micro-organismes se fixe sur des supports poreux inertes ayant un taux de vide d'environ 50% (minéraux, comme la pouzzolane et le coke métallurgique, ou plastiques) à travers lesquels on fait percoler (pénétrer) l'effluent à traiter. En plus du lit bactérien, le procédé met en œuvre un clarificateur où l'eau épurée est séparée de la culture microbienne (Vanrolleghem et al. 2014).

Dans un premier temps, l'effluent est réparti aussi uniformément que possible (dispersion en pluie par une grille de répartition rigoureusement plane) à la surface du filtre.

Le procédé comporte ensuite 2 phases : la phase d'aération et la phase de décantation.

L'aération est réalisée dans le lit bactérien par tirage naturel ou par ventilation.

Ainsi, une aération abondante, par le sommet et le bas du massif filtrant provoque sur ce dernier le développement d'une flore microbienne aérobie et, dès lors, le processus d'oxydation efficace de l'effluent qui y percole lentement (El Moussaoui et al. 2017).

L'entrée de l'effluent se fait toujours à la partie supérieure et l'évacuation (après une éventuelle recirculation) par le fond car, en aucun cas, le massif filtrant ne peut être noyé (arrêt de la fonction aérobie).

De ce fait, son utilisation présente un inconvénient majeur en ce sens qu'elle abaisse fortement la cote du point de sortie de l'effluent (au moins 1 m). Dès lors, sauf conditions topographiques exceptionnelles, son utilisation, sans dispositif de relevage, s'avère utopique en vue d'envisager en aval l'installation d'un dispositif d'épandage (Cherfi et al. 2015).



Figure 13: lit bactérien (C Boutin et al. 2017)

Les boues activées

Ces bassins appelés aussi bassins d'oxydation mettent en œuvre une biomasse bactérienne libre associée en flocons. Ces flocons de boues comprennent des microorganismes hétérotrophes et autotrophes nitrifiants lorsque le temps de séjour de la boue est suffisant pour que leur multiplication produise une biomasse active dans le traitement.

Cette reproduction des microorganismes intervient en conditions favorables, lorsque leur croissance est importante est que les bactéries se mettent à se diviser. Les exo-polymères qu'elles sécrètent leur permettent de s'agglomérer en flocons décantables (Oliveira et al. 2017).

Les conditions d'opération choisies sont celles qui favorisent la décantabilité de ces flocons. Dans ce cas, la biomasse peut être séparée par une seconde décantation où la boue extraite est recirculée vers le bassin de traitement aérobie.

L'aération peut être assurée en surface par des turbines, ou dans le fond par des procédés de rampe de distribution de bulles d'air. Le rendement de transfert peut être amélioré par l'augmentation de la hauteur d'eau (KOUAME et al. 2020).

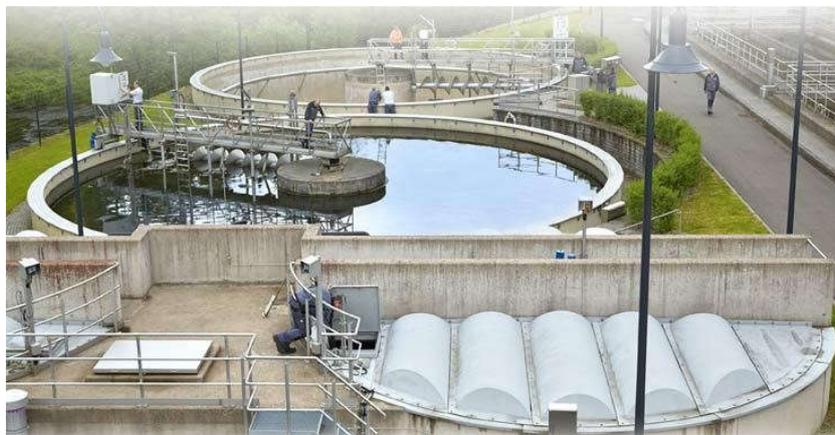


Figure 14: Station d'épuration à boues activées (Larsdotter 2006)

Les disques biologiques

Ce procédé consiste à alimenter en eau usée, préalablement décantée voire tamisée, une cuve contenant des disques en rotation sur un axe horizontal.

Ces disques sont les supports d'un développement de microorganismes épurateurs (biofilm). Le mélange d'eau traitée et de biofilm décroché est dirigé ensuite vers un clarificateur pour la séparation des phases (Céline Boutin et al. 2016).

I.7.3.3.1. Dispositions constructives

- Veiller à ce que les locaux soient construits en matériaux résistant à la corrosion et aux ultraviolets du soleil.
- Vérifier la fiabilité mécanique des systèmes d'entraînement.
- L'armoire électrique doit être dans une pièce séparée de celle des disques biologiques.
- La circulation hydraulique dans la cuve des disques sera soignée.
- Les facilités de montage et de démontage des systèmes d'entraînement, des axes et des disques seront particulièrement surveillées.
- Un système d'entraînement de rechange sera prévu au marché.
- La lubrification des éléments mécaniques sera effectuée grâce un système mécanique.
- La circulation autour des cuves sera aisée. La voie d'accès et le toit du local permettront le changement de modules.
- Les disques seront bien alignés au montage .
- Le local devra être bien aéré et pourra être isolé du froid en cas de risque de gel.

- L'espace entre le fond de la cuve et le bas du support devra être compris entre 10 et 25 cm pour limiter les dépôts (Leriquier 2017).
- Le fond de la cuve doit être en pente vers une purge en point bas.
- Les mises en service en plein hiver sont à éviter.
- Plusieurs étages en série seront prévus (au moins 2 en fonction des objectifs de traitement).
- L'alimentation des cuves sera faite perpendiculairement à l'axe de rotation.



Figure 15: disque biologique (Sirven 2006)

Le lagunage

Le lagunage est un système de traitement des eaux qui se sert des mécanismes naturels de l'environnement où l'eau est épurée par des communautés de micro-organismes variés. L'épuration par lagunage naturel repose sur la présence de bactéries aérobies en cultures libres et d'algues. L'oxygène nécessaire à la respiration bactérienne est produit par des végétaux en présence de rayonnement lumineux.

1.7.3.4.1.Principe et Fonctionnement

Les bactéries présentes dans le système consomment la pollution dissoute dans l'eau pour respirer. L'oxygène est produit grâce aux mécanismes photosynthétiques des algues qui poussent et se développent grâce aux engrais qu'apportent les eaux d'égout. Ces eaux traversent trois bassins successifs d'environ un mètre de profondeur.

-Lors de l'arrivée dans le premier bassin où les bactéries prolifèrent, la partie organique

des eaux usées va être dégradée pour produire des éléments nutritifs. Ces bactéries consomment de l'oxygène et produisent du CO₂. Les particules lourdes décantent dans ce premier bassin et s'accumulent sous forme de boues au fond du bassin (à évacuer après 10ans, peut être épandu dans les terrains agricoles) (El Hachemi 2012).

-Lors de l'arrivée dans le second bassin, les eaux usées sont en présence de sels nutritifs, de soleil et de CO₂. Le phytoplancton se développe et produit ici de l'oxygène. Les bactéries pathogènes sont éliminées.

-Le zooplancton se développe dans le troisième bassin. Il se nourrit avec le phytoplancton produit dans le second bassin et de bactéries. Il consomme de l'oxygène. La clarification de l'eau peut être assurée par le développement de petits crustacés (SEIDL et al. 2003).

Clarification et rejet des effluents

La clarification permet de séparer par décantation l'eau épurée de boues (secondaires) issues de traitement biologique. Cette décantation se fait dans des ouvrages spéciaux, le plus souvent circulaires appelé clarificateurs ou décanteurs secondaires.

Une partie des boues « secondaires » est évacuée en aval vers le traitement des boues, l'autre partie est recyclée vers le bassin d'aération pour maintenir la masse biologique nécessaire au fonctionnement de l'installation (Lozano et al. 2001).

Dns la plupart des cas l'effluent peut être rejeté dans le milieu naturel après la clarification. Le rejet se fait par un canal équipé de capteurs de mesure pour l'autosurveillance de la station.

Traitements complémentaires

Pour obtenir une épuration plus poussée, notamment lorsque la sensibilité du milieu récepteur l'exige (vie piscicole, prise d'eau potable en aval de la station) (Besnault et al. 2014),il peut être nécessaire d'effectuer des traitements complémentaires du type :

-filtration sur le lit de sable.

-désinfection par le chlore ou d'autres produits oxydants (ozone).

-élimination de l'azote.

-élimination du phosphore.

Chapitre II. Généralité sur les microalgues

Le terme «microalgues» s'est progressivement imposé dans les mondes scientifique et industriel. En effet, depuis quelques années, la biotechnologie microalgale est devenue un thème de recherche privilégié permettant d'explorer et d'exploiter l'énorme potentiel de ces microorganismes intervenant au sein de nombreux systèmes et dans de multiples secteurs industriels comme les domaines énergétique, pharmaceutiques, alimentaires et plus récemment environnemental.

Définition et caractéristiques des microalgues

Les microalgues sont des organismes microscopiques photosynthétiques unicellulaires ou pluricellulaires indifférenciés, dont la taille varie de quelques micromètres à une centaine de micromètres. Pour les étudier, il est donc nécessaire de les observer au microscope optique ou électronique (Lauzon 2018). Les microalgues sont délimitées par une membrane plasmique, qui contient au sein de leur cytoplasme de nombreux organites nécessaires à leur fonctionnement et à leur métabolisme (chloroplaste, amyloplaste, oléoplaste, mitochondrie et noyau) (Sadi 2012). Elles se trouvent dans les habitats aquatiques, qu'ils soient marins ou d'eau douce (figure 16).

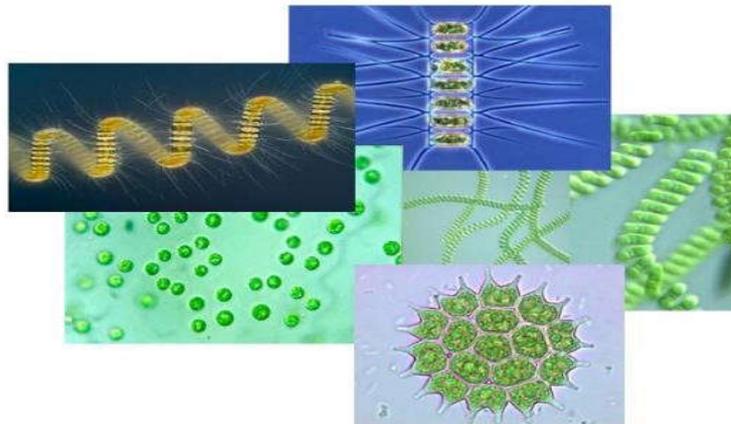


Figure 16: Différentes formes de microalgues (Mohammed 2013)

Leur coloration est due à la coexistence de pigments variés, dont le plus important est la chlorophylle sous ses trois formes (a, b, et c). Cette chlorophylle leur confère la capacité

de synthétiser la matière organique nécessaire à leur développement à partir de molécules simples comme le gaz carbonique et l'eau.

Ces microorganismes appartiennent à deux groupes : les eucaryotes et les procaryotes :

- Les microalgues eucaryotes possèdent une structure cellulaire végétale classique compartimentée, avec ou sans paroi cellulosique, et avec des pigments photosynthétiques renfermés dans des plastes (Zhang et al. 2014).
- Les microalgues procaryotes, appelées aussi cyanobactéries (batteries effectuant la photosynthèse).

Croissance des microalgues

Les microalgues sont des microorganismes. Comme l'ensemble des microorganismes, les microalgues ont une courbe de croissance divisée en quatre temps (Figure 17). Cette courbe est caractéristique de la croissance des microalgues en milieu non renouvelé, c'est-à-dire en milieu naturel ou en mode de culture batch.

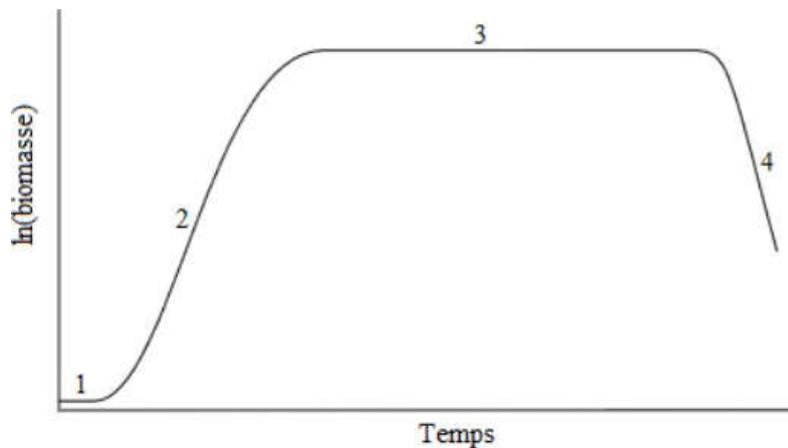


Figure 17: Les phases de croissance des microorganismes (Mohammed 2013)

1. Phase de latence: La phase de latence correspond à la période où le microorganisme s'adapte au milieu, la vitesse de croissance durant cette période est quasi nulle.

2. Phase exponentielle : C'est la phase où la vitesse de croissance est à son maximum et est constante. Les microorganismes se multiplient et la mortalité est faible.

3. Phase stationnaire: Durant cette phase, la capacité du milieu est atteinte, la croissance est nulle, le taux de reproduction est égal au taux de mortalité.

4.Phase de déclin: Phase durant laquelle les microorganismes meurent et ne se reproduisent plus. Les microalgues sont des organismes photoautotrophes, c'est dire que leur source d'énergie est la lumière et que leur source de carbone est un carbone inorganique comme le dioxyde de carbone. Cependant certaines microalgues sont capables de se développer sans lumière, elles sont dites hétérotrophes. Leur source de carbone peut être différents composés organiques comme le glucose (Cadoret et al. 2008).

Certaines algues peuvent se développer en combinant les deux modes, ce sont des organismes mixotrophes. Les microalgues produisent 20 fois plus d'huiles que les cultures terrestres d'oléagineux (Suali et al. 2012). Les microalgues ont une plus grande efficacité photosynthétique, elles fixent donc plus de dioxyde de carbone que les plantes terrestres (Park et al. 2011; Langley et al. 2012).

Classification des microalgues

La classification des microalgues évolue au fil du temps. Elle se faisait traditionnellement, selon la pigmentation et les caractéristiques morphologiques (forme, taille, organisation des chloroplastes, présence, disposition et structure des flagelles) ou biochimiques selon les types de chlorophylle, de la présence ou l'absence des pigments surnuméraires. Actuellement celle-ci est largement bouleversée par l'utilisation d'autres techniques de plus en plus avancées, à la fois en microscopie et en biologie moléculaire (Vanormelingen et al. 2010).

Le terme microalgue regroupe des individus chlorophylliens vivant essentiellement dans l'eau et qui ne sont pas des embryophytes et sont très rarement regroupées en fonction de leur métabolisme énergétique ou encore en fonction de leur habilité à synthétiser les métabolites nécessaires, mais plutôt en fonction de leurs propriétés morphologiques. Il existe donc plusieurs classifications taxonomiques différentes de microalgues, mais elles peuvent être réparties dans sept embranchements, dont les principales sont les cyanophycées, les chrysophycées, les rhodophycées, les euglenophycées, les chlorophycées, les charophycées et les phacophycées (Dejoye 2013).

Cet Arbre souligne la diversité et la distribution des microalgues. Les différents groupes de microalgues sont encadrés ; et les couleurs indiquent la diversité de la pigmentation.

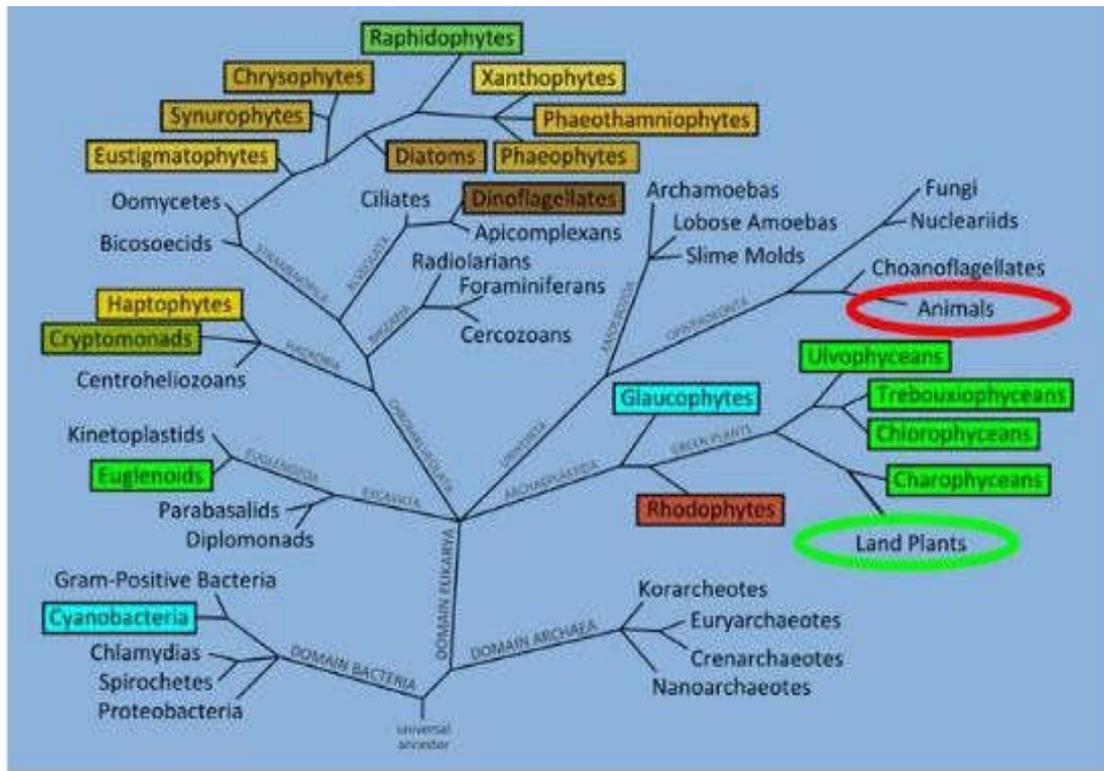


Figure 18: Arbre phylogénétique de classification des microalgues (Borowitzka 2016)

Reproduction des microalgues

Tous les organismes vivants passent par divers stades de vie, plus ou moins différents, avant de revenir à leur état initial. Ce processus est appelé cycle de vie, en raison de son caractère cyclique ou répétitif. La figure 15 montre le cycle de vie des micro-algues qui comprend généralement des processus de reproduction sexuée et/ou asexuée (Abdennadher 2014).

Reproduction asexuée

La prolifération micro-algale s'effectue principalement par une reproduction asexuée ou multiplication végétative : une cellule mère se divise alors en deux cellules filles génétiquement identiques, ce mode de reproduction peut être divisé en trois types (Philippart et al.2009).

- Fragmentation du thalle

- Sporulation
- Scission binaire

Reproduction sexuée

Ce mode est le moins fréquent et le plus aléatoire, généralement déclenchée par des conditions environnementales particulières souvent multifactorielles. Au cours de ce mode de reproduction les gamètes mâle et femelle fusionnent pour produire un zygote diploïde (Vanormelingen et al. 2010).

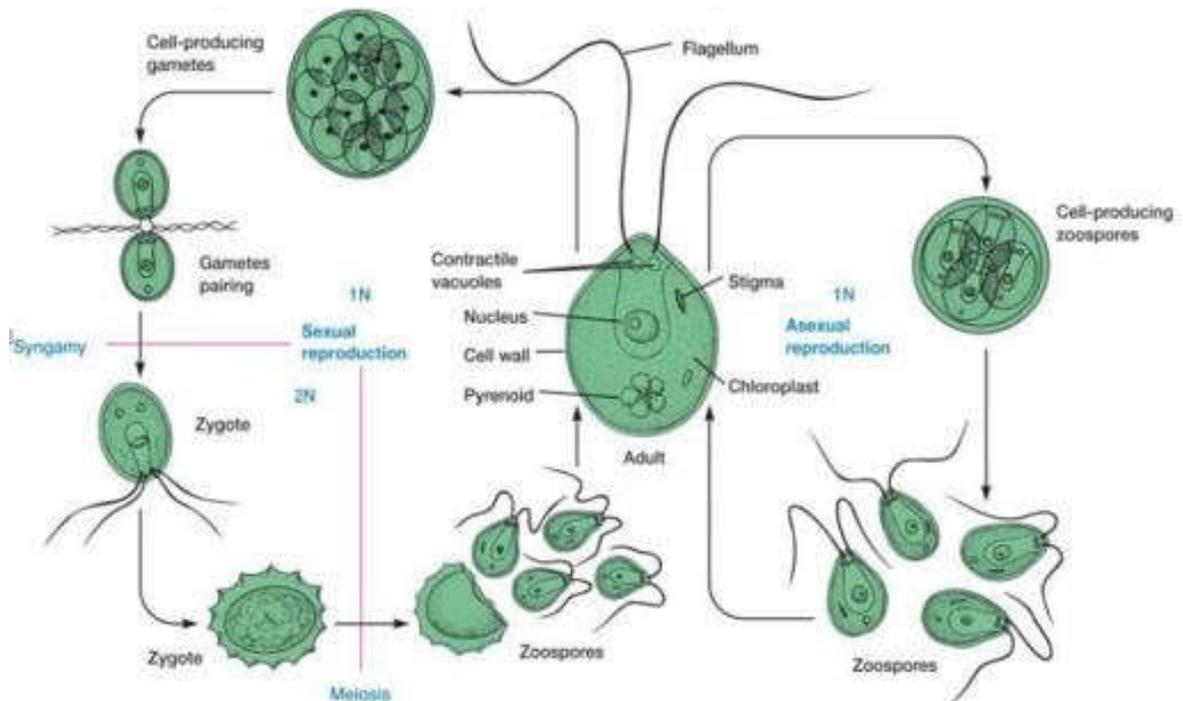


Figure 19: Exemple de reproduction sexuée et asexuée chez *Chlamydomonas* (Mata et al. 2010)

Ces gamètes issus de la transformation du contenu d'une cellule fertile, l'œuf ou le zygote formé se développera pour donner un nouvel individu génétiquement différent des parents. Cet individu diploïde, désigné sous le nom de sporophyte produira, dans les sporocystes, par méiose (réduction du nombre de chromosomes par deux) (Asma et al. 2010).

Culture des microalgues

Milieu de culture

Dans les milieux naturels, les microalgues obtiennent toutes les nutriments, minéraux et vitamines dont ils ont besoin dans l'eau dans laquelle ils vivent. Cependant, pour les développer en laboratoire, nous devons leur fournir toutes ces ressources essentielles, c'est-à-dire que nous devons créer des milieux de croissance.

Les milieux de culture des microalgues font référence à la solution ou à la culture dans laquelle les microalgues se multiplient. Tous les milieux ont plusieurs composants en commun: les sources d'azote (dans les nitrates, les nitrites et l'ammoniac), le phosphore, les vitamines et les éléments traces (Petkov et al. 2012).

Cependant, parmi les milieux de culture synthétiques les plus utilisés par les chercheurs dans la littérature on trouve : BBM (Bischoff 1963), Allen (Allen 1959), AF-6 (Kato 1982).

Les conditions de culture

Les microalgues peuvent se développer dans différentes conditions selon les sources d'énergie et de carbone utilisés.

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

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

c.Culture mixotrophique : Dans la culture mixotrophique, les microalgues peuvent se développer d'une manière autotrophie ou hétérotrophie en fonction de la disponibilité de la lumière et de la concentration en carbone (Martins et al. 2018).

Systeme de culture

La valorisation des métabolites de microalgues, nécessite leur production en masse ou production industrielle. Selon leur utilisation, la culture en masse de microalgues est considérée comme un moyen pour la production à grande échelle de biocarburants.

systemes ouverts

Dans les systemes ouverts une large surface de la culture est exposée au milieu extérieur. La culture se fait en bassin artificiels (Figure 20).

Le mélange et la circulation du milieu sont possibles grâce à des hélices, ou des injecteurs d'air: Le flux est guidé par la vitesse de rotation de cette roue et un système de bullage permet un apport en CO₂. Ces bassins sont en général peu profonds (Dianursanti et al. 2016).

Les systemes ouverts sont plus faciles et moins chers à construire et à exploiter que les réacteurs fermés. Cependant, ces systemes présentent des limites dues à leur contact direct avec le milieu environnant, ce qui peut entrainer des contaminations soit par d'autres espèces de microalgues, soit par des bactéries, virus ou invertébrés (Narala et al. 2016).



Figure 20: Raceways de Cyanotech Corp, Kona, Hawaii (Tan et al. 2015)

systemes fermés

Ces systèmes ont été conçus afin de résoudre les problèmes liés aux systèmes précédents. Ils réduisent les risques de contamination et fournissent un meilleur contrôle des conditions de croissance. Cependant, le développement d'un biofilm de microalgues à la surface des photobioréacteurs est une préoccupation majeure qui peut conduire à une accumulation d'oxygène dans la culture, ce qui peut avoir des effets toxiques sur la photosynthèse (Gupta et al.2015; Louw et al. 2016).

Le photobioréacteur est un système d'agencement de tube dans lequel le milieu de culture va circuler (Figure 21). La suspension microalgale circule du réservoir jusqu'aux tubes qui vont capter la lumière puis des tubes vers le réservoir. Ce système est isolé de l'environnement extérieur, ce qui réduit le risque de contamination auquel sont exposés les systèmes ouverts.

Ce système offre un meilleur contrôle des paramètres de croissance (température, pH, composition du milieu de culture, apport en énergie lumineuse).L'évaporation du milieu de culture est minimisée (Nair et al. 2011).



Figure 21: Photobioréacteur tubulaire de l'Université de Wageningen Algae Parc(Nil 2016)

Systèmes hybrides

Les systèmes de culture de microalgues peuvent être combinés afin d'optimiser le processus de production ; par conséquent, la majorité des bio-usines de microalgues travaillent avec des systèmes dits hybrides (Schenk et al. 2008).

Ces systèmes combinent principalement différents types de systèmes de culture, améliorant la performance globale du produit, combinant également deux stades de croissance (Louw et al. 2016).

Dans la première étape de la culture se déroule dans un photobioréacteur où les conditions sont contrôlées pour minimiser la contamination par les micro-organismes. La deuxième étape consiste à faire pousser la culture dans un bassin ouvert où les cellules sont exposées à un certain stress nutritionnel afin d'augmenter la synthèse d'un métabolite spécifique (lipide, protéine ou carbohydrate) (Park et al. 2013).

Les paramètres influençant la croissance des microalgues

La croissance des microalgues peut être influencée par un certain nombre de facteurs biotiques ainsi que des facteurs abiotiques (Yadav et al. 2017).

Les facteurs biotiques comprennent la présence d'agents pathogènes tels que les bactéries, les champignons, les virus et la compétition avec d'autres microalgues, tandis que les facteurs abiotiques comprennent l'intensité lumineuse (qualité et quantité), la température, le pH, la salinité, le CO₂ dissous et la présence de composés toxiques (Gonçalves et al. 2017). La Figure 22 présente un aperçu schématique des facteurs et des conditions affectant la croissance et la productivité de la biomasse des microalgues (Cadoret et al. 2008).

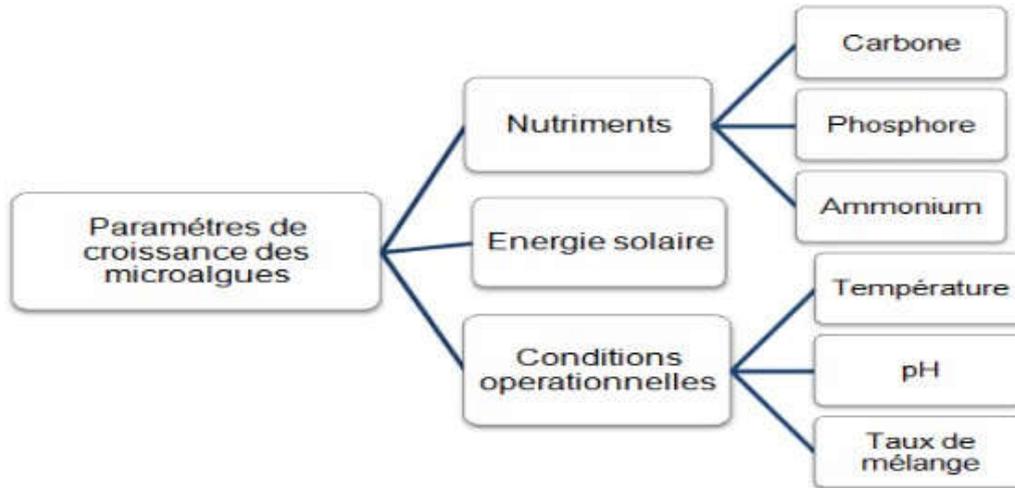


Figure 22: Diagramme des paramètres de croissance des microalgues (L. Yang et al. 2015)

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 23).

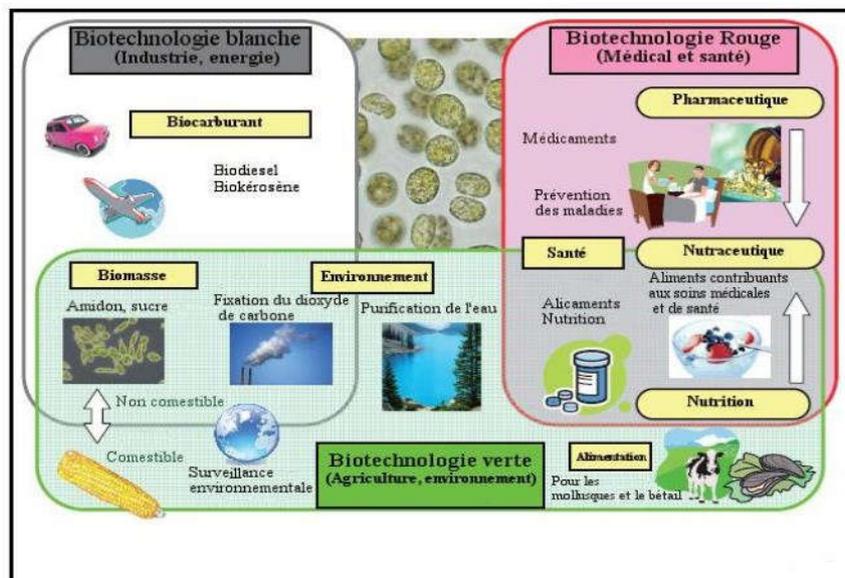


Figure 23: Diversité du champ d'application des microalgues (Becerra-Celis 2009)

Application alimentaires

Certaines espèces des microalgues peuvent être consommées comme des légumes. Plusieurs processus de conservation des microalgues peuvent être utilisés : elles peuvent être séchées, congelées, mises en bocaux, salées ou servies fraîches, la consommation des microalgues est traditionnelle dans de nombreux pays asiatiques.

Les principales espèces consommées sont : *Undaria pinnatifida*, *Laminaria japonica* et *Porphyra* sp. Les microalgues dans l'alimentation sont bénéfiques outre leurs propriétés épaississantes, gélifiantes ou stabilisantes, bien connues et largement utilisées par des industries agro-alimentaires, elles ont aussi des propriétés nutritionnelles intéressantes en alimentation humaine (Becerra-Celis 2009).

Application pharmaceutique

Les microalgues représentent une source intéressante de molécules bioactives et de toxines utilisables dans le développement de nouveaux médicaments pour le traitement de maladies cancéreuses notamment (Pulz et al. 2004)

Les polysaccharides extraits des microalgues permettent la synthèse d'agents antioxydants, antiviraux, anti-tumoraux et anticoagulants, les microalgues sont également capables de synthétiser des vitamines.

Application énergétique

La valorisation de la biomasse algale peut se traduire par la production d'énergie sous forme d'électricité et/ou de chaleur par combustion directe, ou sous forme de bioéthane ou de biocarburant.

Cependant, cette valorisation ne sera concurrentielle qu'avec une forte productivité de biomasse, une possibilité de récolte mécanique simple et un coût de production plus réduit que les procédés mettant en œuvre d'autres types de biomasse (Taylor 2008).

Application cosmétique

Plusieurs espèces de microalgues sont exploitées industriellement dans le domaine cosmétique, principalement les deux espèces *Arthrospira* et *Chlorella* (Stolz et al. 2005).

Des extraits des microalgues, ayant une activité antioxydante, sont exploités sur le marché dans la fabrication des produits de soin capillaire (Park et al. 2013), du visage et de la peau ainsi que dans les crèmes solaires. De même, la synthèse de protéines à partir de la souche *Arthrospira* entraîne une réparation des premiers signes de vieillissement de la peau alors que des extraits de *Chlorella vulgaris* permettent de stimuler la synthèse du collagène dans la peau induisant la réduction des rides (Spolaore et al. 2006).

Les pigments issus des microalgues sont également utilisés dans le domaine cosmétique (De-Bashan et al. 2002).



Figure 24: Des applications variées dans des domaines clés (alimentation, pharmacie, cosmétiques) (Park et al. 2013)

Agrofournitures et traitement de l'eau

En agriculture, les microalgues sont principalement utilisées comme engrais ou comme ingrédient dans la fabrication d'aliment pour le bétail. Concernant les engrais, les microalgues sont transformées en poudre, extraits liquides ou microbilles et sont épandues sur les terres.

En effet, les microalgues favorisent la croissance des plantes, la résistance aux maladies et produisent des substances protectrices contre les agressions par les gastéropodes.

Pour l'alimentation animale, les fuciales sont utilisées comme additifs alimentaires pour leurs qualités digestives. Elles sont transformées en farines mélangées à la nourriture (Barsanti and Gualtieri 2014).

En effet, une importante littérature évaluée l'utilisation des microalgues comme option pour le traitement des eaux usées remonte à 1977 et, bien que mentionnée auparavant (Tamiya et al. 1957), la première étude sur la valeur des eaux usées pour la production des microalgues est apparue en 1979 (Benemann et al. 1979). Par conséquent, au cours des dernières années, la recherche a été consacrée à l'amélioration de l'efficacité du

processus de création de biocarburants à partir de la biomasse algale dérivée des eaux usées (Doe et al. 2010).

Chapitre III. Culture des microalgues dans les eaux usées

L'utilisation des eaux usées pour la culture des microalgues diminue non seulement le besoin d'eau douce qui peut être dirigé pour d'autres utilisations concurrentes, mais fournit en même temps gratuitement des composés organiques, principalement de l'azote et du phosphore, essentiels à la croissance algale (Sekabira et al. 2011; Renuka et al. 2015).

En effet, plusieurs espèces de microalgues ont été étudiées pour le traitement des eaux usées. Les plus employés sont *Chlorella* (Yun et al. 1997; Muñoz et al. 2009; Petrovič et al. 2015), *Botryococcus* (Sawayama et al. 1995), *Scenedesmus* (Martinez et al. 2000; Hodaifa et al. 2008) et *Spiruline* (Chojnacka et al. 2005).

III. 1. Culture des microalgues dans les eaux usées de la station du Ksar de M'raguen Adrar

La qualité des eaux usées entrant au Ksar de M'raguen Adrar est essentiellement domestique. Cette dernière basée sur la technique de filtration par plantes (roseaux) (la présentation de la zone d'étude se trouve dans l'annexe I).

III. 1. 1. Souche et conditions de culture

Chlorella pyrenoidosa et *Chlorococcum.sp* ont été utilisés dans cette étude. Les cultures ont été cultivées en laboratoire. Toutes les inoculations ont été effectuées dans des conditions stériles. 6 ml ($7,5$ à 10^6 cellules / ml) de *C. pyrenoidosa* et *Chlorococcum.sp* ont été inoculés dans 500 ml de milieu BG11 stériles dans des erlenmeyers de 1000 ml. La composition du milieu BG 11 est constituée de: (g / l) NaNO_3 (1,5), K_2HPO_4 (0,04), $\text{MgSO}_4,7\text{H}_2\text{O}$ (0,075), $\text{CaCl}_2,2\text{H}_2\text{O}$ (0,036), Na_2CO_3 (0,02), acide citrique (0,006), EDTA (0,001) et 1 ml de solution d'oligoéléments ayant la composition suivante (g / l): H_3BO_3 (2,86); $\text{MnCl}_2,4\text{H}_2\text{O}$ (1,81); $\text{ZnSO}_4,7\text{H}_2\text{O}$ (0,222); $\text{NaMoO}_4,2\text{H}_2\text{O}$ (0,39); $\text{CuSO}_4,5\text{H}_2\text{O}$ (0,079); $\text{Co}(\text{NO}_3)_2,6\text{H}_2\text{O}$ (0,0494).

Ensuite, des suspensions d'algues à 10% (v / v) ont été inoculées dans des bidons plastiques de 4500 ml d'eau usée obtenue après les prétraitements de la station d'épuration du Ksar de M'raguen.

Chapitre III. Culture des microalgues dans les eaux usées

Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques des eaux usées brutes utilisées dans cette expérience.

Tableau 1 : caractéristiques des eaux usées brutes

Paramètres	unité	valeur
pH	/	7.05
T	°C	27.8
Turbidité	NTU	6.76
Résidu sec à 110°	mg/l	1600
DBO₅	mg/l	70
Conductivité électrique	mS/cm	2.58
NO₂⁻	mg/l	0.06
DCO	mg/l	299.52
NH₄⁺	mg/l	0.56
Ortho-phosphate PO₄³⁻	mg/l	13.68
NO₃⁻	mg/l	2.7
Matières organiques	mg/l	34

III. 1. 2. Méthodes analytiques

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

Les analyses physicochimiques de ce travail ont été effectuées au niveau de laboratoire d'ANRH.

La figure ci-dessous représente les différentes étapes réalisées au sein de laboratoire.

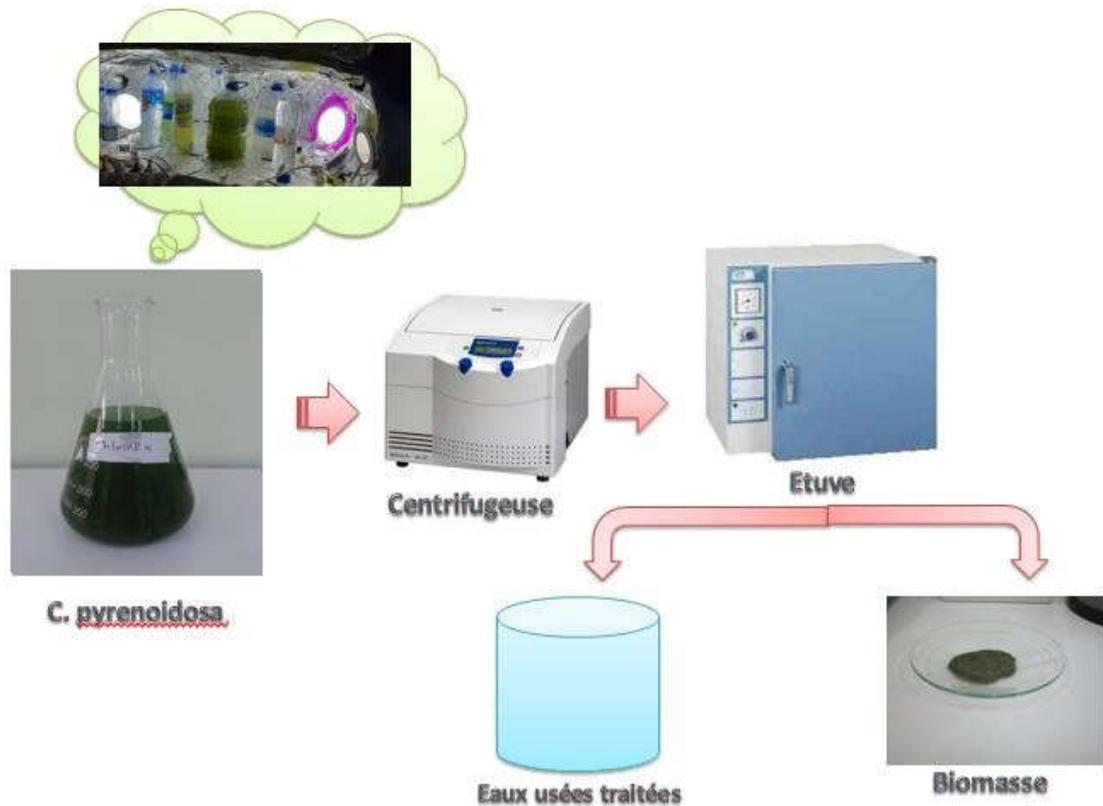


Fig.25. la récupération de l'eau usée traitée et la biomasse

III. 1. 2.1. La mesure du pH

La mesure du pH est simple on prend un bécher après rinçage par de l'eau distillée on le remplit par de l'eau à analyser.

- On allume le pH-mètre (bouton On/Off)
- On rince l'électrode par de l'eau distillée
- On émerge l'électrode dans le bécher contenant de l'eau à analyser et on observe la valeur de pH

III. 1. 2.2. La mesure de la conductivité électrique

- Rincer plusieurs fois la cellule à conductivité, avec de l'eau distillée ;
- Plonger l'électrode complètement dans un récipient contenant l'eau à analyser ;
- Agiter l'échantillon afin que la concentration ionique entre les électrodes soit identique à celle du liquide, cette agitation permet d'éliminer les bulles d'air sur les électrodes ;

- Noter la valeur finale affichée dans le conductimètre.

III. 1. 2.3. La mesure du résidu sec

- Tarer une capsule préalablement lavée, rincée à l'eau distillée et desséchée.
- Prélever 100 ml d'eau à analyser dans une fiole jaugée et déverser la dans la capsule.
- Porter cette dernière à l'étuve à [110°C - 180°C] pendant 24 heures.
- Laisser refroidir pendant ¼ d'heure au dessiccateur.
- Peser immédiatement et rapidement.

Les résultats sont donnés en mg/l.

$$RS \text{ (mg/l)} = (PP - PV) \frac{1000_{[mg]} \times 1000_{[l]}}{100_{[PE]}}$$

D'où PP: est le poids plein de la capsule.

PV: est le poids vide de la capsule.

III. 1. 2.4. La mesure de la turbidité

- Mettre l'appareil sous tension ;
- Entrer le numéro du programme mémorisé pour la turbidité ;
- Ajuster la longueur d'onde ;
- Placer le blanc (eau distillée) ;
- Ajuster le zéro de l'appareil en appuyant sur la touche "zéro" ;
- Retirer le blanc et placer la prise d'essai de l'échantillon ;
- Appuyer " READ " et le résultat en NTU s'affiche.

III. 1. 2.5. La mesure de l'azote ammoniacal (NH₄⁺)

La réaction colorimétrique s'effectue en opérant le mélange suivant :

- ❖ PE : 20 ml.
- ❖ Réactif mélangé : 2 ml.
- ❖ Hypochlorite à 2° Cl : 0,5 ml

La coloration bleue se développe à partir du moment. On laisse les flacons à l'obscurité pendant une heure et demie. La coloration reste stable plusieurs heures. On effectue la mesure colorimétrique à 625 nm.

III.1. 2.6. La mesure de nitrate (NO_3^-)

- Effectuer le dosage dans des flacons bruns, de préférence.
- Réaliser le mélange suivant en introduisant dans le flacon :
 - 1 ml prise d'essai ;
 - 5 ml de solution de soude à 0.05 M ;
 - Agiter ;
 - 5 ml de mélange réducteur ;
 - Agiter ;
 - Après une heure, ajouter 40 ml du mélange colorant ;
 - Mettre à l'obscurité le mélange préparé pendant $\frac{1}{4}$ heure ;
 - Mesurer la densité à 520 nm.

Laisser la coloration se développer dans l'obscurité pendant $\frac{1}{4}$ heure.

Mesurer sa densité à 520 nm.

Le passage à la colorimétrie ne doit intervenir que juste avant la mesure optique afin que la solution soit exposée un minimum de temps à la lumière à laquelle est très sensible.

III. 1. 2.7. La mesure de nitrite (NO_2^-)

Si l'échantillon est coloré par des acides humiques, on l'acidifie par l'acide sulfurique (1 ml/l d'acide sulfurique) et on filtre.

- 50 ml de prise d'essai ;
- 1 ml de solution d'E.D.T.A ;
- 1 ml d'acide sulfanilique ;
- Agiter et attendre 10 mn ;
- 1 ml d' α -naphtylamine ;
- 1 ml de la solution de tampon acétate ;
- Agiter et attendre 30 mn ;

- Effectuer la mesure colorimétrique à 520 nm.

III. 1. 2.8. La mesure d'ortho-phosphates (PO_4^{3-})

Au moment du dosage mélanger la solution molybdique et la solution d'acide ascorbique dans les proportions suivantes :

- 3 volumes de la solution molybdique,
- 1 volume de la solution de l'acide ascorbique ;

Effectuer la réaction dans des tubes à essai

20 ml prise d'essai dans des tubes à essai,

5 ml des réactifs mélangés,

Porter au bain marie à 80°C durant 10 mn,

Ou bien porter à 80° C dans l'étuve pendant 20 mn ;

Laisser refroidir puis mesurer l'absorption à une longueur d'onde de 825 nm

III. 1. 2.9. La mesure de la demande chimique en oxygène (DCO)

- 10 ml d'échantillon.
- 5 ml dichromate $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 0.04 mol.
- Quelques régulateurs d'ébullition.
- 15 ml d'acide sulfurique contenant sulfate d'argent. En agitant soigneusement le tube.
- Mettre 1 ou 2 gouttes d'acide sulfurique sur le col rode.
 - Mettre à l'ébullition pendant 2 heures à 150°C.
 - Retirer les tubes et Laisser refroidir.
 - Transvaser le contenu du tube dans un erlenmeyer de 250 ml, rincer et diluer avec environ 75 ml d'eau distillée.
- Titrer l'excès de bichromate de potassium avec la solution de sulfate de fer (II) et d'ammonium. En présence d'une ou deux gouttes de ferroïne.

III. 1. 2.10. La mesure de la demande biochimique en oxygène (DBO₅)

- L'échantillon d'eau introduit dans une enceinte thermostatée est mis à incuber en présence d'air.
- Prise d'essai dépend de la charge de l'échantillon, celle-ci dépend de l'origine de l'échantillon industrielle ou urbain, de la couleur, de l'odeur et de la charge en matières en suspension.

III. 1. 3. La croissance des microalgues dans les eaux usées

Une eau usée urbaine possède un pouvoir tampon élevé. Les valeurs de pH des eaux usées brutes de station de Ksar de M'raguen (7.05) qui est une caractéristique des eaux résiduaires, dont le pH est souvent de l'ordre de 7.5 à 8, le plus favorable à l'action bactérienne, pour les processus d'épuration aérobie et anaérobie (Franck 2002).

D'après Sevrin et al. (1995), le pH alcalin et la température modérée constituent des conditions de milieu idéales pour la prolifération des microorganismes qui établit un parfait équilibre biologique, permettant la dégradation de la matière organique ce qui conduit à la décontamination de l'eau.

D'après les caractéristiques physicochimiques des eaux usées brutes (Tableau 1), on peut voir que la quantité d'éléments nutritifs dans les eaux usées est supérieure à celle du milieu synthétique BG11. Les eaux usées contiennent d'azote en abondance, disponible sous forme de $\text{NO}_3\text{-N}$ (2.7 mg / L) et de $\text{NH}_4\text{-N}$ (0.56 mg / L) ainsi de phosphore (P) sous forme d'ortho-phosphate (PO_4^{3-}) (13.68 mg / L).

À partir des concentrations de $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ et de $\text{NH}_4\text{-N}$, on a émis l'hypothèse que cette eau usée soutiendrait la croissance des microalgues. Plusieurs études ont démontré une croissance efficace des microalgues dans les eaux usées municipales et agricoles (De Godos et al. 2009; Wang et al. 2010; Yang et al. 2015).

III. 1. 4. Élimination des nutriments des eaux usées

III. 1. 4.1. Élimination d'ammonium

L'azote est un constituant essentiel de la matière vivante, mais sa présence en quantités importantes dans les eaux usées nécessite une surveillance attentive. Cependant, il est présent dans les effluents sous différentes formes : azote organique (Norg), azote ammoniacal (ammoniac NH_3 , ion ammonium NH_4^+), nitrates (NO_3^-), nitrites (NO_2^-).

La concentration initiale en $\text{NH}_4\text{-N}$ était d'environ 0.56 mg / L. Les microalgues ont une capacité intracellulaire considérable pour stocker des molécules d'azote solubles et organiques. L'élimination du $\text{NH}_4\text{-N}$ a été réalisée par l'utilisation directe par les microalgues.

Ruiz-Marin et al. (2010) ont rapporté que les microalgues *C.vulgaris* et *S.obliques* présentaient des préférences pour l'ammonium à toute autre forme d'azote présente dans les eaux usées. Sous des conditions autotrophes et hétérotrophes, l'ammonium est transporté à travers la membrane par un groupe de protéines appartenant à la famille des transporteurs d'ammonium, un groupe de protéines apparentées à l'évolution communément présente dans les bactéries, levures, algues et plantes supérieures (Wilhelm et al. 2006).

D'après la figure 26 qui représente la concentration de l'ammonium, on observe que la quantité d'ammonium des eaux usées brutes est presque totalement dégradée grâce aux microalgues.

L'efficacité d'élimination de NH_4^+ de *C.pyrenoidosa* est 85.71 % ainsi que la souche microalgale *Chlorococcum.sp* qui a une capacité de réduire 83.92% d'ammonium. Par contre, le traitement par plantes (roseaux) n'a pu éliminer d'ammonium (augmentation de la teneur de NH_4^+ plus de 0.3 mg/l).

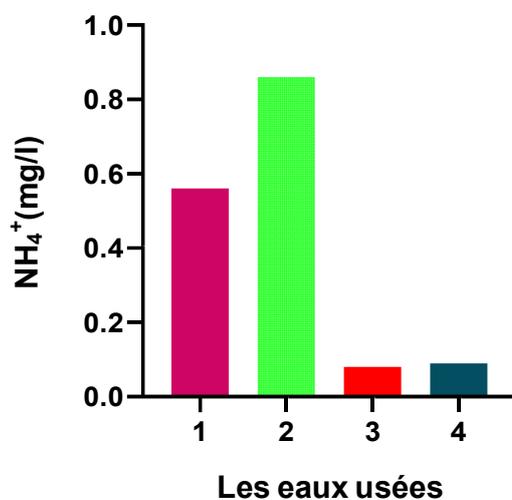


Fig. 26. variation de l'ammonium en mg/l des eaux usées brutes et des eaux usées traitées (ETU): (1) eaux usées brutes, (2) EUT par plantes (roseaux), (3) EUT par *C. Pyrenoidosa*, (4) EUT par *Chlorococcum*

Min et al. (2011) ont également trouvé que *Chlorella. sp* a été capable d'éliminer l'ammonium (61%) des eaux usées domestiques.

En effet, González et al. (2008) ont rapporté que la culture de *C.sorokiniana* mélangée à des boues activées a éliminé 87% du $\text{NH}_4\text{-N}$.

Lau et al. 1995 et Zhou, et al. 2011 ont rapporté que le taux d'élimination de l'ammonium était de 88% et 93% respectivement.

III. 1. 4.2. Élimination de phosphore

Le phosphore a été identifié comme l'élément clé de l'eutrophisation dans les eaux usées par un grand nombre de chercheurs (Doemel et al. 1975; Doran et al. 1979; Holmgren 1985). En effet, le phosphore des eaux usées, particulaire ou soluble, est essentiellement constitué : de phosphore inorganique (essentiellement des polyphosphates) et des orthophosphates dont une part provient de l'hydrolyse des polyphosphates, de phosphore organique : phospholipides, esters, polynucléotides, ATP et ADP.

Le phosphore est considéré comme d'être intermédiaire dans le transfert d'énergie et la synthèse d'acide nucléique. Ce nutriment pénètre dans les cellules de microalgues par transport actif à la membrane plasmique sous forme de H_2PO_4^- et HPO_4^{2-} (Wang et al. 2014). De Godos et al. (2009) ont indiqué que l'absorption de phosphore et les précipitations expliquent l'élimination de phosphore à des pH alcalins compris entre 9 et 11.

La figure 27 représente la concentration d'ortho-phosphate en mg/l des eaux usées brutes ainsi que les eaux usées traitées par plantes (roseaux) et deux souches différentes de microalgues.

Les résultats obtenus montre que l'orthophosphate a été radicalement réduit dans les eaux usées traitées par les souches microalgales durant la période de culture. Les efficacités finales d'élimination du PO_4^{3-} dans les eaux usées traitées par *C.pyrenoidosa* et *Chlorococcum* étaient respectivement de 98.61% et 99.88%. En revanche, les eaux usées traitées par plantes (roseaux) ont éliminé seulement 15.64% de phosphore.

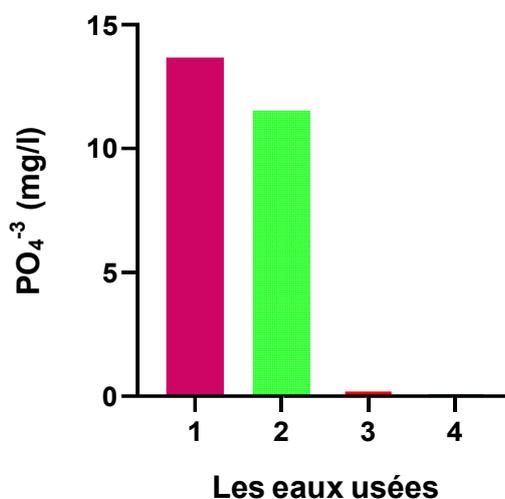


Fig. 27. variation de PO_4^{3-} en mg/l des eaux usées brutes et des eaux usées traitées (ETU): (1) eaux usées brutes, (2) EUT par plantes (roseaux), (3) EUT par *C. Pyrenoidosa*, (4) EUT par *Chlorococcum*

L'élimination des phosphores était beaucoup plus importante que celles rapportées dans d'autres études utilisant les eaux usées municipales (Tam et al. 1989; de-Bashan et al. 2008).

Wang et al. (2010) ont évalué l'efficacité d'élimination des nutriments de *Chlorella. sp* dans les échantillons des eaux usées collectés à différents points de la station d'épuration, *Chlorella. sp* a pu éliminer 83,2 % du phosphore des eaux usées avant la décantation primaire. De plus, Cho et al. (2011) ont rapporté que *Chlorella. sp* éliminait 84,86 % du phosphore total des eaux usées municipales traitées avec une membrane de 0,2 μm .

III. 1. 4.3. Elimination de DCO

Dans le domaine des eaux usées, pour déterminer la pollution d'une eau, on utilise très souvent des paramètres globaux, qui décrivent la somme des pollutions provoquées par des polluants appartenant à un groupe déterminé de composés. L'un de ces paramètres est la demande chimique en oxygène (DCO), qui est une indication sur les quantités de substances organiques chimiquement oxydables, présentes dans l'eau (Bliefert et al. 2007).

La concentration initiale en DCO dans les eaux usées brutes était d'environ 299.52mg / L (tableau 1).

Ma et al. (2014) ont observés que 80% de DCO ont été éliminés au cours des 2 premiers jours de culture. Cela a provoqué une carence nutritionnelle pour la croissance des algues. Cela peut s'expliquer par la participation de bactéries nées des eaux usées utilisant des composés organiques comme source de carbone dans le processus de dégradation (Ma et al. 2014).

D'après la figure ci-dessous (figure 28), on remarque que l'élimination de DCO soit au maximum quand on utilise la souche *C.pyrenoidosa* 93.58%.

L'efficacité moyenne d'élimination de DCO par la souche *Clorococcum.sp* était de 80.76% (figure 28). En ce qui concerne le traitement des eaux usées brutes par plantes (roseaux), la réduction de DCO était 84.30%.

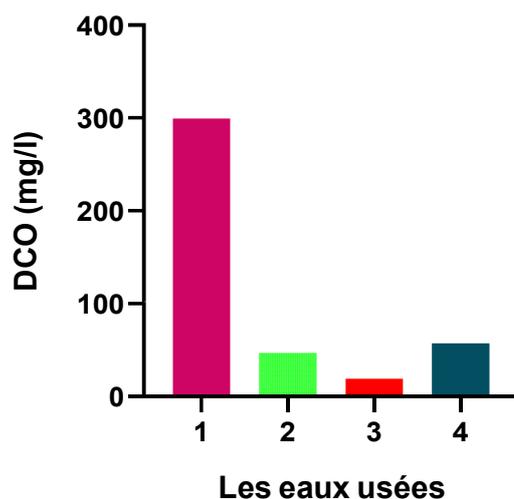


Fig. 28. variation de DCO en mg/l des eaux usées brutes et des eaux usées traitées (ETU): (1) eaux usées brutes, (2) EUT par plantes (roseaux), (3) EUT par *C. Pyrenoidosa*, (4) EUT par *Chlorococcum*

Aziz et al. (1992) ont signalé que le taux d'élimination de DCO de *C. pyrenoidosa* dans les eaux usées domestiques et les eaux usées industrielles provenant d'un élevage de porcs et d'huile de palme était respectivement de 70% et 82% avec un temps de séjour de 15 jours. Ainsi que Sun et al. (2013) ont démontré que *C.pyrenoidosa* réduisait plus de 89% de DCO.

III. 1. 4.4. Elimination de DBO₅

D'après les résultats obtenus (figure 29), on observe que la souche *C.pyrenoidosa* a une efficacité d'élimination de 87.14% de DBO₅. Une efficacité de réduction similaire a été observée dans les eaux usées traitées par plantes (roseaux) et la souche *Clorococcum.sp* avec un taux égale à 82.85%.

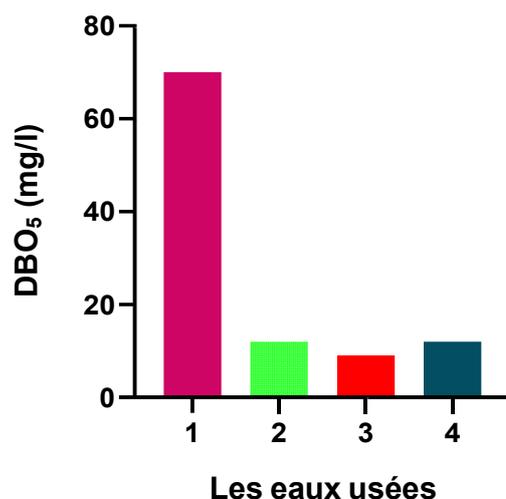


Fig. 29. variation de DBO₅ en mg/l des eaux usées brutes et des eaux usées traitées (ETU): (1) eaux usées brutes, (2) EUT par plantes (roseaux), (3) EUT par *C. Pyrenoidosa*, (4) EUT par *Chlorococcum*

Conclusion générale

La réduction de la pollution des eaux passe essentiellement par l'application de bonnes pratiques par les usagers de l'eau et des milieux aquatiques sur tout le bassin versant. Les objectifs sont multiples : privilégier les activités les moins polluantes, améliorer les usages pour diminuer la quantité de substances utilisées ou rejetées, mais aussi intercepter les flux de polluants dans le bassin versant. Le succès de traitement des eaux usées par les microalgues dépend beaucoup de la sélection, de la culture et de la récolte efficaces des souches microalgales.

Les résultats présentés dans ce travail montrent comment la culture de quelques souches microalgues dans les eaux usées domestiques peut être réalisée plus efficacement. Plus précisément, les principales conclusions de ce travail sont :

- Les résultats démontrent le succès de la culture de *C. pyrenoidosa* et *Chlorococcum.sp* dans les eaux usées dans des systèmes fermés utilisant la lumière artificielle comme une source de lumière. Les traitements à base algues montrent des efficacités plus élevées pour l'élimination des nutriments. *C.pyrenoidosa* a une efficacité de réduction plus élevée que l'autre souche microalgale (*Chlorococcum*).
- L'efficacité d'élimination de NH_4^+ , PO_4^{3-} et DCO par *C.pyrenoidosa* était 85.71 % , 98.61% et 93.58% respectivement. Ainsi que la souche microalgale *Chlorococcum.sp* qui avait une capacité de réduire 83.92% d'ammonium, 99.88% d'ortho-phosphate et 80.76% de la demande chimique en oxygène. Par contre, le traitement par plantes (roseaux) n'avait pu éliminer d'ammonium (augmentation de la teneur de NH_4^+ plus de 0.3 mg/l).

Les résultats obtenus dans ce travail ouvrent de nombreuses perspectives. Les recommandations suivantes peuvent être suggérées pour les prochains travaux :

- Des travaux supplémentaires utilisant d'autres souches, et en particulier évaluations des cultures mixtes de souches locales, car cela pourrait être une approche plus réaliste pour l'intégration des microalgues dans de traitement des eaux usées.

- l'extraction de biodiesel à partir des microalgues en utilisant des catalyseurs à base de graphène.
- L'évaluation des activités antioxydantes, antifongiques et antibactériennes des huiles provenant de l'extraction des microalgues.
- La valorisation de la biomasse algale dans l'alimentation des poissons.

Références bibliographiques

- Abdennadher, M. 2014. “Étude Taxonomique et Écophysiologique Des Dinoflagellés Toxiques Du Golfe de Gabès: *Alexandrium Minutum*, *Prorocentrum Lima*, *Coolia* Spp. & *Ostreopsis Ovata*.” Université de Sfax, Faculté des Sciences,(Tunisie).
- Adewale, Oladipo Adebayo. 2014. “Enhancing Methane Production in the UK WWTP via Co-Digestion of Microalgae and Sewage Sludge.”
- Allen, Mary Belle. 1959. “Studies with *Cyanidium Caldarium*, an Anomalous Pigmented Chlorophyte.” *Archiv Für Mikrobiologie* 32 (3): 270–77.
- Andreozzi, Roberto, Marotta Raffaele, and Paxéus Nicklas. 2003. “Pharmaceuticals in STP Effluents and Their Solar Photodegradation in Aquatic Environment.” *Chemosphere* 50 (10): 1319–30.
- Angers, Nantes, and Le Mans. 2015. “Aumaya TALEB.”
- Asano, Takashi, and Audrey D Levine. 1996. “Wastewater Reclamation, Recycling and Reuse: Past, Present, and Future.” *Water Science and Technology* 33 (10–11): 1–14.
- Aslan, Sebnem, and Ilgi Karapinar Kapdan. 2006. “Batch Kinetics of Nitrogen and Phosphorus Removal from Synthetic Wastewater by Algae.” *Ecological Engineering* 28 (1): 64–70.
- Asma, BEZAF, and LATRECHE Fahima. 2010. “Le Fonctionnement de Méristème Primaire Chez Les Végétaux.” Université Mohamed BOUDIAF de M’Sila.
- Aulicino, F A, A Mastrantonio, P Orsini, C Bellucci, M Muscillo, and G Larosa. 1996. “Enteric Viruses in a Wastewater Treatment Plant in Rome.” *Water, Air, and Soil Pollution* 91 (3–4): 327–34.
- Ayed, Lamia, Jihane Cheriaa, Abdelkarim Cheref, and Amina Bakhrouf. 2009. “Traitement Biologique Des Eaux Usées Textiles—Étude de Cas: Station d’épuration Des Eaux Usées Textiles.” *Cahiers de l’Association Scientifique Européenne Pour l’Eau et La Santé* 14 (1): 27–37.
- Aziz, M A, and W J Ng. 1992. “Feasibility of Wastewater Treatment Using the Activated-Algae Process.” *Bioresource Technology* 40 (3): 205–8.
- Bahlaoui, A, C H Serghini, and M Sbaa. 2012. “Remerciements.”
- Barsanti, Laura, and Paolo Gualtieri. 2014. *Algae: Anatomy, Biochemistry, and Biotechnology*. CRC press.
- Becerra-Celis, Giuliana. 2009. “Proposition de Stratégies de Commande Pour La Culture de Microalgue Dans Un Photobioréacteur Continu.” Ecole Centrale Paris.
- Bendida, Ali, Abdellatif El Bari Tidjani, Abdelkader Badri, Mohamed Amine Kendouci, and Mohamed Nabou. 2013. “Treatment of Domestic Wastewater from the Town of Bechar by a Sand Filter (Sand of Beni Abbes Bechar Algeria).” *Energy Procedia* 36: 825–33. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.095>.
- Benemann, John R. 1979. “Production of Nitrogen Fertilizer with Nitrogen-Fixing Blue-Green Algae.” *Enzyme and Microbial Technology* 1 (2): 83–90.
- Bengherbia, Abdelmalek, Fella Hamaidi, Rabia Zahraoui, Mohand Said Hamaidi, and Smain Megateli. 2014. “Impact Des Rejets Des Eaux Usées Sur La Qualité Physico-Chimique et Bactériologique de l’Oued Beni Aza (Blida, Algérie).” *Lebanese Science Journal* 15 (2): 39–51.
- Besnault, S, S Martin Ruel, H Budzinski, Cecile Miege, M Esperanza, S Baig, and

- Marina Coquery. 2014. “Procédés de Traitement Complémentaire Intensifs Pour Améliorer l'élimination Des Micropolluants Organiques Présents Dans Les Eaux Usées.” In *GRUTTEE, Xe Congrès International*, 27.
- Bischoff, H C. 1963. “Some Soil Algae from Enchanted Rock and Related Algal Species.” *Phycological Studies IV. University of Texas Publ. No. 6318 6318*: 1–95.
- Bliefert, Claus, and Robert Perraud. 2007. *Chimie de l'environnement: Air, Eau, Sols, Déchets*. De Boeck Supérieur.
- Borowitzka, Michael A. 2016. *Algal Physiology and Large-Scale Outdoor Cultures of Microalgae*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-24945-2>.
- Boutin, C, C Eme, C Boutin, C Eme Domestic, and Wastewater Characterization. 2017. “Domestic Wastewater Characterization by Emission Source To Cite This Version : HAL Id : Hal-01469077 Domestic Wastewater Characterization by Emission Source.”
- Boutin, Céline, O Caquel, N Dimastromatteo, M A Durot, Gersende Fernandes, S Parotin, S Prost Boucle, A Rodier, and C Tscherter. 2016. “Ouvrages de Traitement Par Disques Biologiques: Guide d'exploitation.”
- Briand, Enora. 2008. “Contribution à La Compréhension Du Déterminisme de La Mise En Place Des Proliférations de Cyanobactéries et de Leur Production de Toxines.” 270.
- Cadoret, Jean-Paul, and Olivier Bernard. 2008. “La Production de Biocarburant Lipidique Avec Des Microalgues: Promesses et Défis.” *Journal de La Société de Biologie* 202 (3): 201–11.
- Campos, C. 2008. “New Perspectives on Microbiological Water Control for Wastewater Reuse.” *Desalination* 218 (1–3): 34–42.
- Castillon, P. 2005. “Le Phosphore: Sources, Flux et Rôles Pour La Production Végétale et l'eutrophisation.” *Productions Animales* 18 (3): 153–58.
- Chaouki, I, L Mouhir, M Fekhaoui, A El Abidi, A Bellaouchou, and M El Morhit. 2015. “Application de l'analyse En Composantes Principales (ACP) Pour l'évaluation de La Qualité Des Eaux Usées Industrielles de Salam Gaz–Skhirat.” *Journal of Materials and Environmental Science* 6 (2): 455–64.
- Cherfi, Abdelhamid, Mohamed Achour, Malika Cherfi, Samia Otmani, and Assia Morsli. 2015. “Health Risk Assessment of Heavy Metals through Consumption of Vegetables Irrigated with Reclaimed Urban Wastewater in Algeria.” *Process Safety and Environmental Protection* 98: 245–52. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2015.08.004>.
- Cho, Sunja, Thanh Thao Luong, Dukhaeng Lee, You-Kwan Oh, and Taeho Lee. 2011. “Reuse of Effluent Water from a Municipal Wastewater Treatment Plant in Microalgae Cultivation for Biofuel Production.” *Bioresource Technology* 102 (18): 8639–45.
- Chojnacka, Katarzyna, Andrzej Chojnacki, and Helena Gorecka. 2005. “Biosorption of Cr³⁺, Cd²⁺ and Cu²⁺ Ions by Blue–Green Algae *Spirulina* Sp.: Kinetics, Equilibrium and the Mechanism of the Process.” *Chemosphere* 59 (1): 75–84.
- Cruz, Jean-François, Patrice Thauay, Thierry Goli, Jean-Paul Fleuriot, Antoine Delpech, Thierry Ferré, Ignace Medah, and Fanta Guindo. 2016. “Valorisation Du Fonio. Le Dessableur Hydrolift.” In .
- Dahdou-guebas, M Farid, M Philippe Jusiak, M Luc Lambs, M Bernard Montuelle,

- Directeur De Recherche, M Jean-luc Rols, Directeur De Recherche, M Bernhard Zeller, and Directeur De Recherche. 2010. "Doctorat de l'université de Toulouse."
- De-Bashan, Luz E, Manuel Moreno, Juan-Pablo Hernandez, and Yoav Bashan. 2002. "Removal of Ammonium and Phosphorus Ions from Synthetic Wastewater by the Microalgae *Chlorella Vulgaris* Coimmobilized in Alginate Beads with the Microalgae Growth-Promoting Bacterium *Azospirillum Brasilense*." *Water Research* 36 (12): 2941–48.
- de-Bashan, Luz E, Adan Trejo, Volker a R Huss, Juan-Pablo Hernandez, and Yoav Bashan. 2008. "Chlorella Sorokiniana UTEX 2805, a Heat and Intense, Sunlight-Tolerant Microalga with Potential for Removing Ammonium from Wastewater." *Bioresource Technology* 99 (11): 4980–89. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.09.065>.
- Dejoye, Céline. 2013. "Eco-Extraction et Analyse de Lipides de Micro-Algues Pour La Production d'algo-Carburant." Université d'Avignon.
- Des, P A R, and Procédés Mixtes. 2012. "DÉPARTEMENT DES SCIENCES AGRONOMIQUES THÈSE de DOCTORAT Spécialité : Agronomie Option : Génie Des Procédés Présenté Par M r METAHRI Mohammed Saïd."
- Diagne, Ibrahima, Samba Drame, Momar Ndiaye, and Birame Ndiaye. 2017. "Caractérisation Physico-Chimique et Contamination Métallique Des Eaux Usées Déversées Au Niveau de La Baie de Hann (Dakar / Sénégal) Physico-Chemical Characterization and Metallic Contamination of Wastewater Discharged at Hann Bay (Dakar / Senegal)" 11 (February): 462–72.
- Diagne, Ibrahima, Samba Drame, Momar Ndiaye, Birame Ndiaye, and Abdoulaye Diop. 2017. "Caractérisation Physico-Chimique et Contamination Métallique Des Eaux Usées Déversées Au Niveau de La Baie de Hann (Dakar/Sénégal)." *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 11 (1): 462–72.
- Dianursanti, Albert Santoso, and Muthia Delaamira. 2016. "Utilization of *Chlorella Vulgaris* to Fixate a High Concentration of Carbon Dioxide in a Compost-Based Medium." *Chemical Engineering* 7 (1).
- Doe, Camille, Mona Bafadhel, Salman Siddiqui, Dhananjay Desai, Vijay Mistry, Paul Rugman, Margaret McCormick, Joanne Woods, Richard May, and Matthew A Sleeman. 2010. "Expression of the T Helper 17-Associated Cytokines IL-17A and IL-17F in Asthma and COPD." *Chest* 138 (5): 1140–47.
- Doemel, W N, and A E Brooks. 1975. "Detergent Phosphorus and Algal Growth." *Water Research* 9 (8): 713–19.
- Doran, Michael D, and William C Boyle. 1979. "Phosphorus Removal by Activated Algae." *Water Research* 13 (8): 805–12.
- Dudkowski, Alexandre. 2000. "L'épandage Agricole Des Boues de Stations d'épuration d'eaux Usées Urbaines." *Le Courrier de l'environnement de l'INRA*, no. 41: 134–35.
- Gassara, Fatma, Satinder K Brar, R D Tyagi, and J R Valero. 2011. "Dégradation Biologique Du Bisphénol A Dans Les Eaux Usées." *Environmental Reviews* 19 (NA): 32–54.
- Godos, Ignacio De, Saúl Blanco, Pedro A García-Encina, Eloy Becares, and Raúl Muñoz. 2009. "Long-Term Operation of High Rate Algal Ponds for the Bioremediation of Piggery Wastewaters at High Loading Rates." *Bioresource Technology* 100 (19):

- 4332–39.
- Gonçalves, Ana L, José C M Pires, and Manuel Simões. 2017. “A Review on the Use of Microalgal Consortia for Wastewater Treatment.” *Algal Research* 24: 403–15.
- González, Cristina, Judith Marciniak, Santiago Villaverde, Pedro A García-Encina, and Raúl Muñoz. 2008. “Microalgae-Based Processes for the Biodegradation of Pretreated Piggery Wastewaters.” *Applied Microbiology and Biotechnology* 80 (5): 891–98.
- Gupta, N, D K Khan, and S C Santra. 2008. “An Assessment of Heavy Metal Contamination in Vegetables Grown in Wastewater-Irrigated Areas of Titagarh, West Bengal, India.” *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 80 (2): 115–18.
- Gupta, Prabuddha L, Seung-Mok Lee, and Hee-Jeong Choi. 2015. “A Mini Review: Photobioreactors for Large Scale Algal Cultivation.” *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 31 (9): 1409–17.
- Hachemi, Ouafae El. 2012. “Traitement Des Eaux Usées Par Lagunage Naturel En Milieu Désertique (Oasis de Figuig): Performances Épuratoires et Aspect Phytoplanktonique.”
- Hadji Feyrouz, Boucceredj Imane. 2020. “Analyse Physico-Chimique et Microbiologique de l’eau.”
- Hamoda, Mohamed F. 2004. “Water Strategies and Potential of Water Reuse in the South Mediterranean Countries.” *Desalination* 165: 31–41.
- Hase, Eiji, Yuji Morimura, and Hiroshi Tamiya. 1957. “Some Data on the Growth Physiology of *Chlorella* Studied by the Technique of Synchronous Culture.” *Archives of Biochemistry and Biophysics* 69: 149–65.
- Hena, S., H. Znad, K. T. Heong, and S. Judd. 2018. “Dairy Farm Wastewater Treatment and Lipid Accumulation by *Arthrospira Platensis*.” *Water Research* 128: 267–77. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.10.057>.
- Hodaifa, Gassan, Ma Eugenia Martínez, and S Sánchez. 2008. “Use of Industrial Wastewater from Olive-Oil Extraction for Biomass Production of *Scenedesmus Obliquus*.” *Bioresource Technology* 99 (5): 1111–17.
- Holmgren, Staffan. 1985. “Phytoplankton in a Polluted Subarctic Lake before and after Nutrient Reduction.” *Water Research* 19 (1): 63–71.
- Huang, GuanHua, Feng Chen, Dong Wei, XueWu Zhang, and Gu Chen. 2010. “Biodiesel Production by Microalgal Biotechnology.” *Applied Energy* 87 (1): 38–46.
- Hyaric, Ronan Le. 2009. “Caractérisation, Traitabilité et Valorisation Des Refus de Dégrillage Des Stations d’épuration.” Thèse de doctorat en sciences de l’environnement industriel et urbain
- Jayakumar, Saravanan, Mashitah M Yusoff, Mohd Hasbi Ab Rahim, Gaanty Pragas Maniam, and Natanamurugaraj Govindan. 2017. “The Prospect of Microalgal Biodiesel Using Agro-Industrial and Industrial Wastes in Malaysia.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 72: 33–47.
- Kalle, Kurt. 1963. “Über Das Verhalten Und Die Herkunft Der in Den Gewässern Und in Der Atmosphäre Vorhandenen Himmelblauen Fluoreszenz.” *Deutsche Hydrografische Zeitschrift* 16 (4): 153–66.
- Karen, Soude Marilyn, BOTHON F T Diane, Deguenon H E Justine, KOUDORO Y Alain, Agbangnan D C Pascal, Mama Daouda, and WOTTO D Valentin. 2018.

- “Analyses Physico-Chimique et Bactériologique Des Eaux Usées de Quelques Hôtels de Cotonou.” *International Journal of Innovation and Applied Studies* 23 (2): 227–34.
- Kato, S. 1982. “Laboratory Culture and Morphology of Colacium Vesiculosum Ehrb.(Euglenophyceae).” *Jpn. J. Phycol.* 30: 63–67.
- Kellogg, Robert L, Charles H Lander, D C Moffitt, and N Gollehon. 2000. “Manure Nutrients Relative to the Capacity of Cropland and Pastureland to Assimilate Nutrients.” *US Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service and Agricultural Research Service.*
- Khalil, F, O Bouaouine, H Chtioui, S Souabi, M A Aboulhassan, and A Ouammou. 2015. “Traitement Des Lixiviats de Décharge Par Coagulation-Floculation (Treatment of Landfill Leachate by Coagulation-Flocculation).” *J. Mater. Environmen. Sci* 6 (5): 1337–42.
- Kimura, Katsuki, Shiho Toshima, Gary Amy, and Yoshimasa Watanabe. 2004. “Rejection of Neutral Endocrine Disrupting Compounds (EDCs) and Pharmaceutical Active Compounds (PhACs) by RO Membranes.” *Journal of Membrane Science* 245 (1–2): 71–78.
- Kligerman, Debora Cynamon, and Edward J Bouwer. 2015. “Prospects for Biodiesel Production from Algae-Based Wastewater Treatment in Brazil: A Review.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 52: 1834–46.
- Koprivanac, Natalija, and Hrvoje Kušić. 2009. *Hazardous Organic Pollutants in Colored Wastewaters*. Nova Science Publishers, Inc.
- KOUAME, Konan Lopez, and Nogbou Emmanuel ASSIDJO. 2020. “Simulation Du Traitement Par Boues Activées Des Effluents Industriels En Milieu Anaérobie: Cas de Sania En Côte d’Ivoire.” *Rev. Ivoir. Sci. Technol* 35: 97–110.
- Langley, N M, S T L Harrison, and R P Van Hille. 2012. “A Critical Evaluation of CO₂ Supplementation to Algal Systems by Direct Injection.” *Biochemical Engineering Journal* 68: 70–75.
- Larsdotter, Karin. 2006. *Sammanfattning Som Del i En Studie Där Hydroponisk Avloppsrening Undersökts Testades Även.*
- Lau, P S, N F Y Tam, and Y S Wong. 1995. “Effect of Algal Density on Nutrient Removal from Primary Settled Wastewater.” *Environmental Pollution* 89 (1): 59–66.
- Lauzon, Jules A. 2018. “Optimisation de La Technique d’électrocoagulation Pour La Récolte de La Biomasse Algale Pour La Production de Biopétrole.” Université du Québec à Trois-Rivières.
- Leclercq, Bérénice. 2016. “Impact de La Pollution Particulaire Sur La Cancérogenèse Pulmonaire: Relation Entre Caractéristiques Physicochimiques et Mécanismes Toxicologiques.” Université du Droit et de la Santé-Lille II.
- Leriquier, F. 2017. “Évaluation et Comparaison Des Performances de Quatre Procédés de Traitement Conventionnel (Boues Activées, Disques Biologiques, Filtres Plantés à Écoulement Vertical et Lagunage Naturel) En Territoire Ultramarin.” M2 TVRN spécialité TQ, Université Picardie Jules Verne et Université de
- Li, Yecong, Wenguang Zhou, Bing Hu, Min Min, Paul Chen, and Roger R Ruan. 2011. “Integration of Algae Cultivation as Biodiesel Production Feedstock with Municipal Wastewater Treatment: Strains Screening and Significance Evaluation of

- Environmental Factors.” *Bioresource Technology* 102 (23): 10861–67.
- Logroño, Washington, Mario Pérez, Gladys Urquizo, Abudukeremu Kadier, Magdy Echeverría, Celso Recalde, and Gábor Rákhely. 2017. “Single Chamber Microbial Fuel Cell (SCMFC) with a Cathodic Microalgal Biofilm: A Preliminary Assessment of the Generation of Bioelectricity and Biodegradation of Real Dye Textile Wastewater.” *Chemosphere* 176: 378–88.
- Loucif, Karim, Souad Neffar, Taha Menasria, Mohamed Cherif Maazi, Moussa Houhamdi, and Haroun Chenchouni. 2020. “Physico-Chemical and Bacteriological Quality Assessment of Surface Water at Lake Tonga in Algeria.” *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management* 13: 100284.
- Louw, Tobias M, Melinda J Griffiths, Sarah M J Jones, and Susan T L Harrison. 2016. “Techno-Economics of Algal Biodiesel.” In *Algae Biotechnology*, 111–41. Springer.
- Lozano, Yves, and Patrick Varoquaux. 2001. “Rapport de Mission En Inde. Mission Exploratoire MAE-Programme 2001. Application de La Chaîne Du Froid à La Conservation Des Bioproduits Sous Atmosphère Modifiée. Application Des Techniques Séparatives Membranaires à l’extraction de Bioproduits et à La Clarification Des Effluents.”
- Lucas, Françoise, A Gonçalves, Pierre Servais, Vincent Rocher, S Masnada, Claire Thériat, L Lesage, and Jean Marie Mouchel. 2012. “Variabilité de La Qualité Microbiologique Des Eaux Usées Brutes Dans Une Grande Agglomération.” *Techniques Sciences Méthodes*, no. 4: 44–55.
- Ma, Xiaochen, Wenguang Zhou, Zongqiang Fu, Yanling Cheng, Min Min, Yuhuan Liu, Yunkai Zhang, Paul Chen, and Roger Ruan. 2014. “Effect of Wastewater-Borne Bacteria on Algal Growth and Nutrients Removal in Wastewater-Based Algae Cultivation System.” *Bioresource Technology* 167 (September): 8–13. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.05.087>.
- Margot, Jonas, and Anoy Magnat. 2011. “Elimination Des Micropolluants Dans Les Eaux Usées-Essais Pilotes à La Station d’Épuration de Lausanne.” *Gwa* 7 (ARTICLE): 487–93.
- Martins, António A, Francisca Marques, Madalena Cameira, Edgar Santos, Sara Badenes, Luís Costa, Vitor Verdelho Vieira, Nídia S Caetano, and Teresa M Mata. 2018. “Water Footprint of Microalgae Cultivation in Photobioreactor.” *Energy Procedia* 153: 426–31.
- Martinez, M E, S Sánchez, J M Jimenez, F El Yousfi, and L Munoz. 2000. “Nitrogen and Phosphorus Removal from Urban Wastewater by the Microalga *Scenedesmus Obliquus*.” *Bioresource Technology* 73 (3): 263–72.
- Mata, Teresa M., António A. Martins, and Nidia S. Caetano. 2010. “Microalgae for Biodiesel Production and Other Applications: A Review.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (1): 217–32. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.020>.
- Mehanned, S, A Chahlaoui, A Zaid, M Samih, and M Chahboune. 2014. “Typologie de La Qualité Physicochimique de l’eau Du Barrage Sidi Chahed-Maroc [Typology of the Physic-Chemical Quality of the Waters of the Dam Sidi Chahed-Morocco].” *Journal of Materials and Environmental Science* 5 (2): 1633–42.
- Min, Min, Liang Wang, Yecong Li, Michael J Mohr, Bing Hu, Wenguang Zhou, Paul Chen, and Roger Ruan. 2011. “Cultivating *Chlorella* Sp. in a Pilot-Scale

- Photobioreactor Using Centrate Wastewater for Microalgae Biomass Production and Wastewater Nutrient Removal.” *Applied Biochemistry and Biotechnology* 165 (1): 123–37.
- Mohammed, Kasim. 2013. “Microalgal Photobioreactors for Carbon-Efficient Wastewater Treatment.”
- Moilleron, R, Christophe Morin, L Paulic, A Marconi, V Rocher, R Mailler, A Bressy, and L Garrigue-Antar. 2020. “Caractérisation Du Potentiel Toxique Des Eaux Urbaines Par Bioessais–Cas de l’agglomération Parisienne.” *Techniques Sciences Méthodes*, no. 12: 175–94.
- Moussaoui, Tawfik El, Said Wahbi, Laila Mandi, Salvatore Masi, and Naaila Ouazzani. 2017. “Reuse Study of Sustainable Wastewater in Agroforestry Domain of Marrakesh City.” *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*.
<https://doi.org/10.1016/j.jssas.2017.08.004>.
- Mraovic, Tanguy, Sabine Lautman, Sébastien Mouliade, and Patrick Jacoulet. 2016. “Doigt de Grillage: Une Nouvelle Entité Lésionnelle. Classification et Stratégie Thérapeutique.” *Hand Surgery and Rehabilitation* 35 (6): 437.
- Muñoz, Raul, Claudia Köllner, and Benoit Guieysse. 2009. “Biofilm Photobioreactors for the Treatment of Industrial Wastewaters.” *Journal of Hazardous Materials* 161 (1): 29–34.
- Nair, Beena B, and Shri A M M Murugappa. 2011. “Antibacterial Activity of Eight Marine Microalgae against a Few Gram Negative Bacterial Pathogens” 4 (9): 3024–26.
- Narala, Rakesh R, Sourabh Garg, Kalpesh K Sharma, Skye R Thomas-Hall, Miklos Deme, Yan Li, and Peer M Schenk. 2016. “Comparison of Microalgae Cultivation in Photobioreactor, Open Raceway Pond, and a Two-Stage Hybrid System.” *Frontiers in Energy Research* 4: 29.
- Nil, Case Study. 2016. “Accepted Manuscript Heterotrophic Cultivation of *Chlorella Pyrenoidosa* Using Sucrose as the Sole Carbon Source by Co-Culture with *Rhodotorula Glutinis*.” *Bioresource Technology*.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.09.010>.
- Oliveira, Pedro, Carole Coufort-Saudejaud, Marion Alliet, and Christine Frances. 2017. “Procédé de Traitement Des Eaux Usées Par Boues Activées: Lien Entre Les Propriétés Morphologiques Des Floes et l’âge de Boue.” *Revue Des Sciences de l’eau/Journal of Water Science* 30 (1): 29–32.
- Park, J B K, R J Craggs, and A N Shilton. 2011. “Wastewater Treatment High Rate Algal Ponds for Biofuel Production.” *Bioresource Technology* 102 (1): 35–42.
- Park, Young-Tae, Hongkyun Lee, Hyun-Shik Yun, Kyung-Guen Song, Sung-Ho Yeom, and Jaeyoung Choi. 2013. “Removal of Metal from Acid Mine Drainage Using a Hybrid System Including a Pipes Inserted Microalgae Reactor.” *Bioresource Technology* 150: 242–48.
- Parlanti, Edith, K Wörz, Laure Geoffroy, and Michel Lamotte. 2000. “Dissolved Organic Matter Fluorescence Spectroscopy as a Tool to Estimate Biological Activity in a Coastal Zone Submitted to Anthropogenic Inputs.” *Organic Geochemistry* 31 (12): 1765–81.
- Perez-Garcia, Octavio, Froylan M E Escalante, Luz E de-Bashan, and Yoav Bashan. 2011. “Heterotrophic Cultures of Microalgae: Metabolism and Potential Products.”

- Water Research* 45 (1): 11–36.
- Petkov, Georgi, Albena Ivanova, Ivan Iliev, and Irina Vaseva. 2012. “A Critical Look at the Microalgae Biodiesel.” *European Journal of Lipid Science and Technology* 114 (2): 103–11.
- Petrovič, A, and M Simonič. 2015. “The Effect of Carbon Source on Nitrate and Ammonium Removal from Drinking Water by Immobilised *Chlorella Sorokiniana*.” *International Journal of Environmental Science and Technology* 12 (10): 3175–88.
- Philippart, Jean-Claude, and Patrick Kestemont. 2009. “Synthèse Du Rapport Final Pour La Période Février 2008-Janvier 2009 de La Convention d’étude Pour Le Suivi Scientifique de La Réhabilitation Du Saumon Atlantique Dans Le Bassin de La Meuse (Projet Meuse Saumon 2000).” Université de Liège.
- Pinay, Gilles, Chantal Gascuel, Alain Ménesguen, Yves Soudon, Morgane Le Moal, Alix Levain, Claire Etrillard, Florentina Moatar, Alexandrine Pennard, and Philippe Souchu. 2018. *L'eutrophisation*. éditions Quae.
- Pulz, Otto, and Wolfgang Gross. 2004. “Valuable Products from Biotechnology of Microalgae.” *Applied Microbiology and Biotechnology* 65 (6): 635–48.
- Radhia, OULARBI. 2016. “Traitement Des Eaux Usées Urbaines de La Ville de Ain Defla Par Électrocoagulation.”
- Razzak, Shaikh Abdur, Saad Aldin M Ali, Mohammad Mozahar Hossain, and Hugo deLasa. 2017. “Biological CO₂ Fixation with Production of Microalgae in Wastewater—a Review.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 76: 379–90.
- Renuka, N, A Sood, R Prasanna, and A S Ahluwalia. 2015. “Phycoremediation of Wastewaters : A Synergistic Approach Using Microalgae for Bioremediation and Biomass Generation,” 1443–60. <https://doi.org/10.1007/s13762-014-0700-2>.
- Renuka, Nirmal, Anjali Sood, Sachitra K Ratha, Radha Prasanna, and Amrik S Ahluwalia. 2013. “Evaluation of Microalgal Consortia for Treatment of Primary Treated Sewage Effluent and Biomass Production.” *Journal of Applied Phycology* 25 (5): 1529–37.
- Rifai, Ahmad. 2013. “Étude de La Dégradation Par Photolyse Directe de Pesticides- Caractérisation Structurale et Toxicité Potentielle Des Photoproduits.” Ecole Polytechnique X.
- Rocher, Vincent, Johnny Gasperi, Sam Azimi, Solène Gilbert, and Catherine Paffoni. 2011. “Comportement Des Substances Prioritaires Sur Les Ouvrages de Traitement Des Eaux Usées-Cas de La Décantation Lamellaire et de La Biofiltration.” *Techniques Sciences Méthodes*, no. 3: 20–34.
- Rodier, J, B Legube, N Merlet, and R Brunet. 2005. “Water Analysis: Natural Waters, Wastewaters, Sea Water.” *Ed. Dunod, Paris*, 1384.
- Ruiz-Marin, Alejandro, Leopoldo G Mendoza-Espinosa, and Tom Stephenson. 2010. “Growth and Nutrient Removal in Free and Immobilized Green Algae in Batch and Semi-Continuous Cultures Treating Real Wastewater.” *Bioresource Technology* 101 (1): 58–64.
- Ruiz, J, Z Arbib, P D Álvarez-Díaz, C Garrido-Pérez, J Barragán, and J A Perales. 2013. “Photobiotreatment Model (PhBT): A Kinetic Model for Microalgae Biomass Growth and Nutrient Removal in Wastewater.” *Environmental Technology* 34 (8): 979–91.
- Sadi, Meriem. 2012. “Les Micro Algues: Un Défi Prometteur Pour Des Biocarburants

- Propres.” *Revue Des Energies Renouvelables SIENR’12 Ghardaïa*, 195–202.
- Saida, AZLAOUI, and ZENATI Naima. 2019. “Evaluation de La Qualité Physicochimique et Microbiologique de l’eau Consommée Au Site de l’université Ziane Achour de Djelfa.” Université Ziane Achour-Djelfa: Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie.
- Samira, Lakhel, Maghlout Chiraz, and Merzougui Rebiha. 2020. “Evaluation de l’effet Génotoxique Par Le Test d’Allium Cepa Des Éventuels Perturbateurs Endocriniens Présents Dans Les Eaux Usées de La Station de Guelma.”
- Sawayama, Shigeki, Seiichi Inoue, Yutaka Dote, and Shin-Ya Yokoyama. 1995. “CO₂ Fixation and Oil Production through Microalga.” *Energy Conversion and Management* 36 (6–9): 729–31.
- Schenk, Peer M, Skye R Thomas-Hall, Evan Stephens, Ute C Marx, Jan H Mussnug, Clemens Posten, Olaf Kruse, and Ben Hankamer. 2008. “Second Generation Biofuels: High-Efficiency Microalgae for Biodiesel Production.” *Bioenergy Research* 1 (1): 20–43.
- SEIDL, Martin, Jean Marie MOUCHEL, U EIER, and CENHICA Aquadev. 2003. “Valorisation Des Eaux Usées Par Lagunage Dans Les Pays En Voie de Développement.” *Centre D’Enseignement et de Recherche Eau Ville Environnement, Centre Conjoint de L’ÉNGREF, de L’ÉNPC et de L’ÉUPVM*.
- Sekabira, K, H Oryem Origa, T A Basamba, G Mutumba, and E Kakudidi. 2011. “Application of Algae in Biomonitoring and Phytoextraction of Heavy Metals Contamination in Urban Stream Water.” *International Journal of Environmental Science & Technology* 8 (1): 115–28.
- Sirven, Jean-baptiste. 2006. “Centre de Physique Moléculaire Optique et Hertzienne DÉTECTION DE MÉTAUX LOURDS DANS LES SOLS PAR SPECTROSCOPIE D’ÉMISSION SUR PLASMA INDUIT PAR LASER (LIBS).”
- Sonune, Amit, and Rupali Ghate. 2004. “Developments in Wastewater Treatment Methods.” *Desalination* 167: 55–63.
- Spolaore, Pauline, Claire Joannis-Cassan, Elie Duran, and Arsène Isambert. 2006. “Commercial Applications of Microalgae.” *Journal of Bioscience and Bioengineering* 101 (2): 87–96.
- Stolz, Patrick, and Barbara Obermayer. 2005. “Manufacturing Microalgae for Skin Care.” *Cosmetics and Toiletries* 120 (3): 99–106.
- Suali, Emma, and Rosalam Sarbatly. 2012. “Conversion of Microalgae to Biofuel.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (6): 4316–42.
- Sun, Xuefei, Cunwen Wang, Zihao Li, Weiguo Wang, Yanjie Tong, and Jiang Wei. 2013. “Microalgal Cultivation in Wastewater from the Fermentation Effluent in Riboflavin (B₂) Manufacturing for Biodiesel Production.” *Bioresource Technology* 143: 499–504.
- Tam, N. F.Y., and Y. S. Wong. 1989. “Wastewater Nutrient Removal by *Chlorella Pyrenoidosa* and *Scenedesmus* Sp.” *Environmental Pollution* 58 (1): 19–34. [https://doi.org/10.1016/0269-7491\(89\)90234-0](https://doi.org/10.1016/0269-7491(89)90234-0).
- Tan, Xiao-bo, Ya-lei Zhang, Li-bin Yang, Hua-qiang Chu, and Jun Guo. 2015. “Outdoor Cultures of *Chlorella Pyrenoidosa* in the Effluent of Anaerobically Digested Activated Sludge: The Effects of PH and Free Ammonia.” *BIORESOURCE TECHNOLOGY*. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.10.095>.

- Tarmoul, F. 2007. "Détermination de La Pollution Résiduelle d'une Station d'épuration Par Lagunage Naturel «cas de La Lagune de Beni-Messous»." *Mémoire de DEUA, Institut Des Sciences de La Mer et de l'aménagement Du Littoral, Alger*.
- Taylor, Gail. 2008. "Biofuels and the Biorefinery Concept." *Energy Policy* 36 (12): 4406–9.
- Toze, Simon. 1999. "PCR and the Detection of Microbial Pathogens in Water and Wastewater." *Water Research* 33 (17): 3545–56.
- Vanormelingen, Pieter, and Caroline Souffreau. 2010. "DNA Barcoding for Species Identification and Discovery in Diatoms." *Cryptogamie, Algologie* 31 (4): 557–77.
- Vanrolleghem, Peter, and Paul Lessard. 2014. "GEX-7004: Traitement Des Eaux Usées."
- VIVIER, Paul. 1970. "Influence de La Pollution Organique Sur La Faune Aquatique Des Eaux Courantes." *Bulletin Français de Pisciculture*, no. 236: 89–104.
- Wang, Liang, Yecong Li, Paul Chen, Min Min, Yifeng Chen, Jun Zhu, and Roger R Ruan. 2010. "Anaerobic Digested Dairy Manure as a Nutrient Supplement for Cultivation of Oil-Rich Green Microalgae *Chlorella* Sp." *Bioresource Technology* 101 (8): 2623–28.
- Wang, Liang, Min Min, Yecong Li, Paul Chen, Yifeng Chen, Yuhuan Liu, Yingkuan Wang, and Roger Ruan. 2010. "Cultivation of Green Algae *Chlorella* Sp. in Different Wastewaters from Municipal Wastewater Treatment Plant." *Applied Biochemistry and Biotechnology* 162 (4): 1174–86.
- Wang, Meng, Wenye Camilla Kuo-Dahab, Sona Dolan, and Chul Park. 2014. "Kinetics of Nutrient Removal and Expression of Extracellular Polymeric Substances of the Microalgae, *Chlorella* Sp. and *Micractinium* Sp., in Wastewater Treatment." *Bioresource Technology* 154: 131–37.
- Wilhelm, Christian, Claudia Büchel, Joachim Fisahn, Reimund Goss, Torsten Jakob, Julie LaRoche, Johann Lavaud, Martin Lohr, Ulf Riebesell, and Katja Stehfest. 2006. "The Regulation of Carbon and Nutrient Assimilation in Diatoms Is Significantly Different from Green Algae." *Protist* 157 (2): 91–124.
- Xu, Zhenzhen, Yue Ben, Zhonglin Chen, Anxi Jiang, Jimin Shen, and Xiaoyun Han. 2018. "Application and Microbial Ecology of Psychrotrophs in Domestic Wastewater Treatment at Low Temperature." *Chemosphere* 191: 946–53. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.10.121>.
- Yadav, Geetanjali, and Ramkrishna Sen. 2017. "Microalgal Green Refinery Concept for Biosequestration of Carbon-Dioxide Vis-à-Vis Wastewater Remediation and Bioenergy Production: Recent Technological Advances in Climate Research." *Journal of CO2 Utilization* 17: 188–206.
- Yang, Libin, Xiaobo Tan, Deyi Li, Huaqiang Chu, Xuefei Zhou, Yalei Zhang, and Hong Yu. 2015. "Nutrients Removal and Lipids Production by *Chlorella Pyrenoidosa* Cultivation Using Anaerobic Digested Starch Wastewater and Alcohol Wastewater." *Bioresource Technology* 181 (January): 54–61. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.01.043>.
- Yang, Yong, Fu-Suo Zhang, Hua-Fen Li, and Rong-Feng Jiang. 2009. "Accumulation of Cadmium in the Edible Parts of Six Vegetable Species Grown in Cd-Contaminated Soils." *Journal of Environmental Management* 90 (2): 1117–22.
- Yapo, Bernard O, Véronique Mambo, Arsène Séka, Armel D Yapi, and Pascal Houenou. 2009. "Caractérisation Par Fractionnement Gravimétrique de La Matière Organique

- Contenue Dans Les Eaux Usées: Application à l'étude de La Biodégradabilité.”
Journal de de La Société Ouest-Africaine de Chimie 27: 21–37.
- Yun, Yeoung Sang, Sun Bok Lee, Jong Moon Park, Choong Il Lee, and Ji Won Yang.
1997. “Carbon Dioxide Fixation by Algal Cultivation Using Wastewater Nutrients.”
Journal of Chemical Technology and Biotechnology 69 (4): 451–55.
- Zhang, Weiguo, Peiliang Zhang, Hao Sun, Maozhen Chen, Shan Lu, and Pengfu Li.
2014. “Bioresource Technology Effects of Various Organic Carbon Sources on the
Growth and Biochemical Composition of *Chlorella Pyrenoidosa*.” *BIORESOURC
TECHNOLOGY* 173: 52–58. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.09.084>.

Annexe I

I. Fiche technique de la station du KSAR M'RAGUEN wilaya d'Adrar



LE KSAR DE M'RAGUEN

- Situation: 12 km au Nord du chef-lieu de la Wilaya
- Population: 824 habitants en 2012
- Nombre de familles: 198
- Taux de croissance: 1,8 %

La station d'épuration de M'RAGUEN

La station d'épuration a été réalisée en 2 tranches. Tous les cycles de traitement sont préréglés et entièrement automatiques.

1^{ère} tranche:

- Clôture sur le pourtour de la station d'épuration
- Branchement sur le réseau d'assainissement de M'Raguen pour l'alimentation de la STEP
- Dégrilleur des eaux usées brutes
- Fosse de réception avec pompes pour l'alimentation du réseau d'aspersion des filtres primaires
- 2 filtres primaires avec bassins en maçonnerie plantés de roseaux, avec réseau d'aspersion automatique fonctionnant séparément par cycles de 3 à 4 jours
- Fosse de réception des eaux traitées dans filtres primaires avec pompes pour nettoyage du réseau d'aspersion et alimentation d'un réseau d'irrigation
- Local technique et magasin de pièces de rechange pour la maintenance de la station

2^{ème} tranche:

- Extension de la clôture
- 1 filtre primaire avec bassin en géomembrane planté de roseaux avec réseau d'aspersion automatique
- 1 filtre de finition des eaux traitées dans les 3 filtres primaires avec pompe d'alimentation placée dans un regard
- Extension du local technique
- 1 bloc sanitaire comprenant : 1 WC avec lavabo -1 douche

a) Données générales de la STEP

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

b) Bases de dimensionnement de la STEP

Paramètres	Unités	Quantités
Charge hydraulique		
Equivalent. habitant	EQ.H	850

Volume journalier	m ³ /j	100
Débit moyen de temps sec	m ³ /h	.
Débit de pointe temps sec	m ³ /h	.
Débit maximal admis en temps de pluie	m ³ /h	.
Charge polluante		
Charge journalière en DCO	Kg/j	27.335
Charge journalière en DBO ₅	Kg/j	1.232
Charge journalière en MES	Kg/j	.
Charge en azote ammoniacal (N- NH ₄)	Kg/j	1.750

c) Procédé de traitement

Filière eau	Filière boues
04 Bassins filtrants à écoulement vertical plantés de roseaux et 01 bassin de filtration horizontal plantés de roseaux.	Très faible production de boues. Curage des filtres tous les 5 à 10 ans

d) Principales contraintes [4]

Principales contraintes	Observation
Le débit des eaux usées à l'entrée de la Step est actuellement de : m ³ /j	
.....	
.....	

II. Présentation du projet d'extension

❖ Installation

L'étude de la station d'épuration a été réalisée à partir des éléments fournis par l'ONA. Le débit moyen annoncé était inférieur à 10 litres par jour par habitant. Ce débit semblant très faible, il a été retenu 30 litres, soit 25 m³/jour. Lors de la réception de la station d'épuration le débit était de 50 m³/jour. Le débit a ensuite progressivement augmenté pour se stabiliser depuis quelques mois entre 160 et 200m³/jour.

Cette station d'épuration entièrement écologique réalisée par ENGIE dans le cadre des actions RSE (Responsabilité Sociétale Environnementale) a été prévu pour servir de modèle à reproduire dans le pays. Il est donc indispensable d'apporter une extension permettant d'assurer les résultats prévisionnels. Cette extension comprendrait:

- Adjonction d'un filtre primaire
- Installation d'un filtre de finition

❖ Construction du filtre primaire

Ce bassin filtrant sera identique aux 2 bassins filtrants existants. Il aura pour dimensions:

- Longueur intérieure: 12 mètres
- Largeur intérieure: 5 mètres
- Hauteur intérieure: 1,80 mètre

Le bassin sera réalisé en béton armé. Les agrégats de filtration seront identiques à ceux des deux filtres. Les pompes d'aspersion et des eaux d'arrosage des roseaux pendant la période de repos des filtres permettant le développement des bactéries installées, permettent de supporter cette extension. Le réseau d'aspersion sera réalisé en tube PEHD équipé de colliers de prise en charge permettant des réglages de débit. Les roseaux seront prélevés dans les deux filtres existants.

❖ Bassins de filtration de finition

Il est prévu deux bassins de finition ayant chacun pour dimensions:

- Longueur: 15 mètres
- Largeur: 10 mètres
- Profondeur: 1 mètre

Ces bassins seront partiellement enterrés de façon à recevoir par gravité les eaux traitées dans les filtres primaires. Le terrassement sera effectué avec un engin de chantier. Le sable retiré sera repoussé sur le talus existant autour de la station d'épuration. Il avait été créé avec les excédents de sable lors du terrassement de la station actuelle. Il servira de barrière au sable déplacé du désert lors de vents importants

En fond de fouille compactage de 8 cm. de tout venant et pose d'un film polyane renforcé.

Coulage d'une longrine et du radier de 12 cm. d'épaisseur en béton dosé à 350 kg/m³ armé d'un treillis soudé ou ligaturé avec mailles de 20 x 20 cm., en fer de 10. Les murs périphériques et la séparation de 15 cm. d'épaisseur, seront réalisés en béton armé dosé à 350 kg./m³. En fond de bassins, il sera placé des drains ventilés.

Les 2 bassins seront remplis de matériaux filtrants identiques à ceux utilisés pour la station de traitement existante.

Ces bassins seront plantés de roseaux prélevés dans la station existante, à raison de 4 pieds par m².

❖ Evacuation de l'eau traitée

Les sorties en PVC des drains ventilés des bassins de finition, seront raccordées à la fosse de réception de l'eau traitée existante. Cette eau sera utilisée pour d'une capacité utile de 8 m³, qui sera construite à l'intérieur de la station existante.

L'eau traitée sera ensuite envoyée vers le bassin des eaux traitées existants pour être rejetées dans le réseau d'assainissement principal ou utilisée pour l'irrigation agricole.

III. Fonctionnement la station d'épuration par phyto-épuration

La phyto-épuration se sert des facultés épuratrices naturelles des plantes aquatiques et de leur milieu pour assainir l'eau. Cette végétation sert de support à des colonies bactériennes (bactéries aérobies) qui transforment les matières organiques des eaux usées en matières minérales, qui finissent absorbées par les plantes.

En échange, les plantes alimentent les bactéries en oxygène par leurs racines. Elles assimilent également le nitrate et le phosphate ainsi que certains polluants de l'eau et s'en servent comme « de l'engrais ». Ainsi, le système ne produit pas de boues. L'eau récupérée en fin de traitement est principalement réutilisée en irrigation agricole.

Les eaux brutes sont recueillies après dégrillage dans une fosse. Elles sont ensuite envoyées par pompage ou gravitairement suivant le relief du terrain dans un ou plusieurs étages de filtres primaires à écoulement vertical rempli d'agrégats calibrés de différentes granulométries et plantés de roseaux. L'eau brute distribuée par bâchées dans un filtre qui reste en service pendant une période de 2 à 3 jours. Après cette période le filtre est mis en repos et les eaux brutes sont envoyées dans le second filtre primaire pendant une période de 2 à 3 jours et ensuite, le premier filtre est remis en service et ainsi de suite. Les eaux traitées dans les filtres primaires sont ensuite envoyées dans un filtre de finition à écoulement horizontal, rempli d'agrégats calibrés et planté de roseaux. Le filtre de finition est constamment en charge. L'eau traitée sort du filtre par un siphon qui récupère l'eau à la base du filtre et permet de maintenir un niveau constant du fil d'eau, légèrement en dessous du niveau extérieur de la surface du filtre. En sortie du filtre de finition, l'eau traitée peut immédiatement être utilisée en irrigation ou pour d'autres usages.

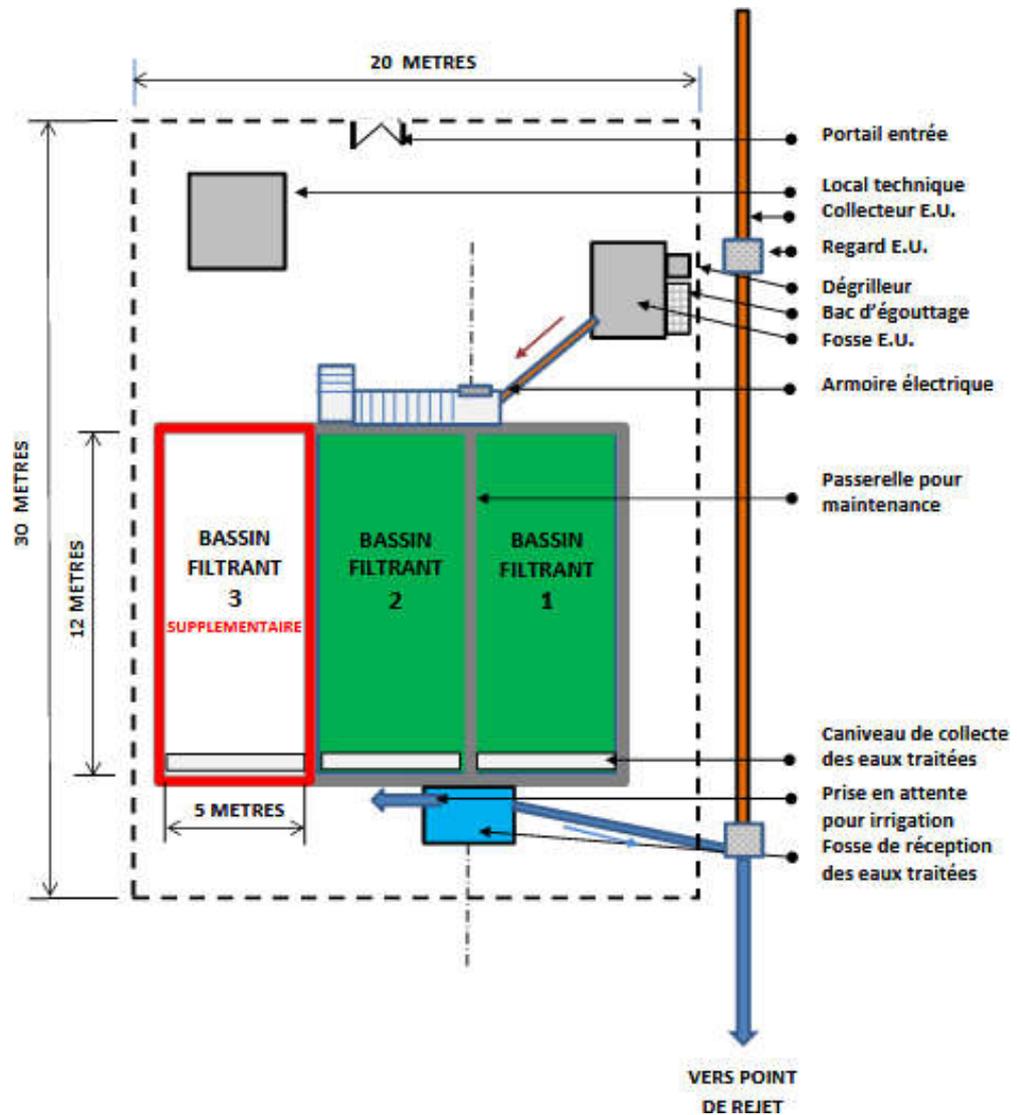


Figure 1 : Station d'épuration du KSAR DE M'RAGUEN avec filtre primaire supplémentaire

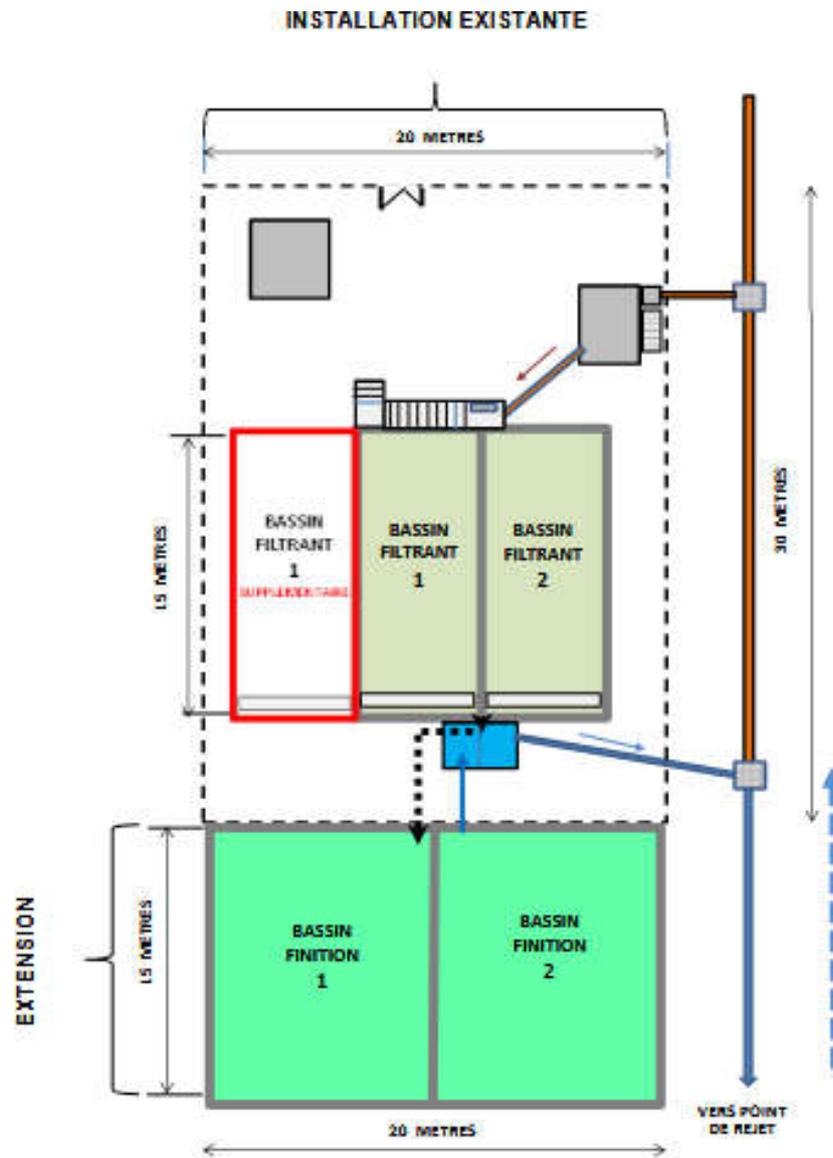


Figure 2 : station d'épuration du KSAR DE M'RAGUEN extension de la station avec filtre de finition

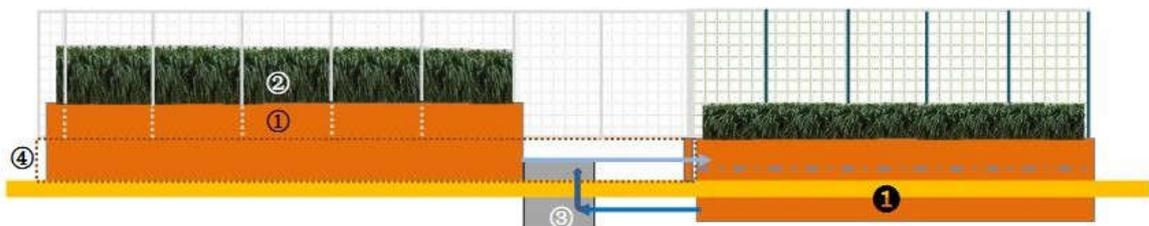


Figure 3 : vue en élévation de la station actuelle et de son extension

Station d'épuration existante

- 1) Bassins filtrants (filtration primaire)
- 2) Plantation de roseaux
- 3) Doubles fosses de réception des eaux des 2 bassins filtrants, de recyclage vers le bassin filtrant et de renvoi vers bassins filtrants de finition avec pompes immergées.
- 4) Clôture: Mur de soubassement en maçonnerie avec poteau en acier peint et panneaux en treillis soudés peints. En partie supérieure, protection par barbelés Concertina

Extension de la station d'épuration

1. 2 bassins filtrants semi-enterrés en béton armé dimensions intérieures:2 x10 m. x 15m. -Longrine avec radier intégré en béton armé
 - -Murs et séparation en béton armé.
2. Plantation de roseaux
3. Alimentation du bassin filtrant
4. Fosse réception des eaux traitées avec pompe de immergée. Les eaux traitées sont envoyées dans le réseau d'assainissement ou vers réseau d'irrigation
5. Alimentation réseau d'irrigation
 -

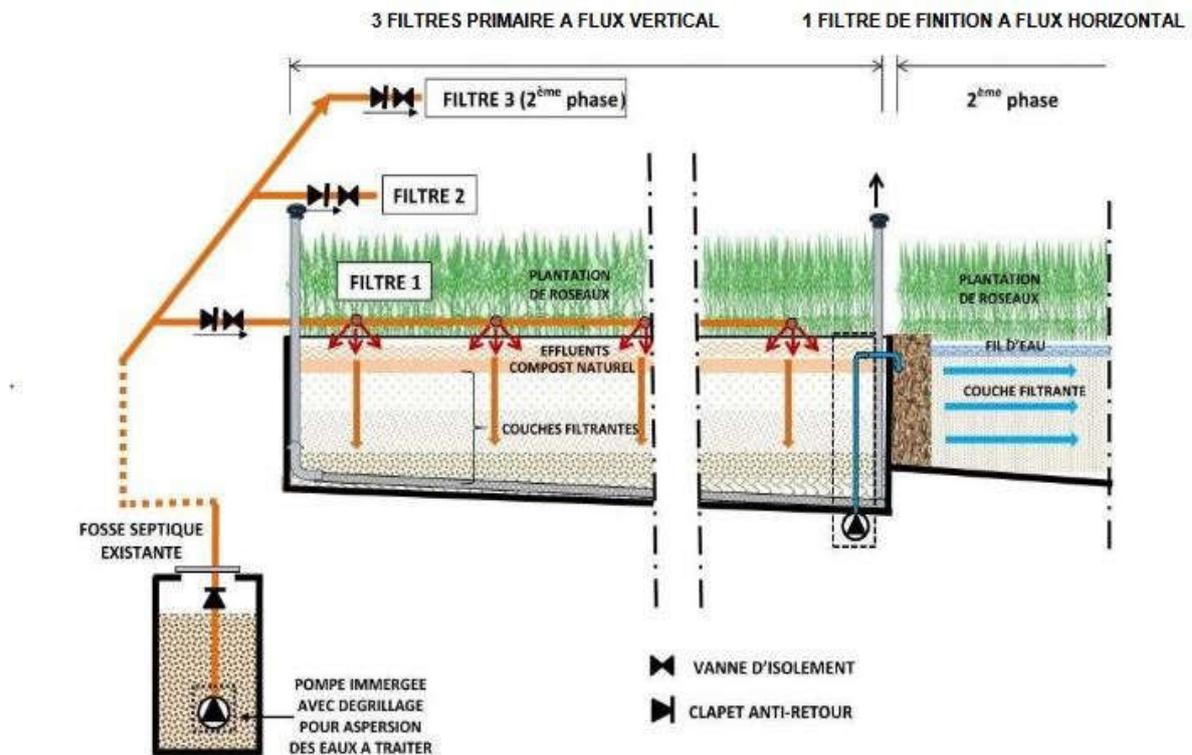


Figure 4 : Fonctionnement des filtres.

IV. Fonctionnement basic de la station d'épuration

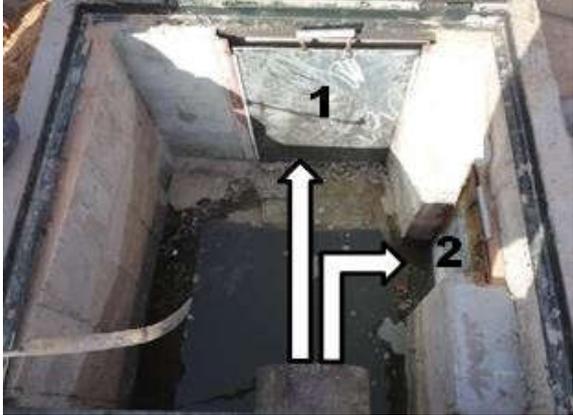
Mise en route de la station d'épuration

Toutes les vannes et l'alimentation électrique sont en position fermée

- 1) Les eaux usées du réseau principal arrivent dans le regard A la vanne batardeau
 - A-1 est fermée, la vanne batardeau A-2 est ouverte
- 2) Mettre sous tension l'armoire électrique F.
 - Ouvrir la porte de l'armoire
 - La mettre sous tension en enclenchant le disjoncteur général
 - Vérifier le cycle des bâchées des 2 pompes d'aspersion des bassins de filtration (actuellement 6 bâchées/jour).
 - Mettre sous tension une pompe du circuit eau brute
 - Refermer la porte de l'armoire électrique. En cas de réouverture, pour des raisons de sécurité, mettre l'armoire hors tension en appuyant sur le bouton à l'extérieur de la porte "Coupure générale de l'armoire".
- 3) Pour la mise en route du réseau d'aspersion G du bassin 1 par exemple
 - Ouvrir les vannes I-1 et I-2
 - Ouvrir la vanne H-1
 - Mettre la pompe correspondante sous tension en appuyant sur le bouton à l'extérieur de l'armoire électrique F.

- 4) Vérifier que l'eau sort régulièrement sur l'ensemble du réseau d'aspersion du bassin de filtration en service

Le cycle des bâchées se fera automatiquement, suivant les programmes définis. Lors de la remise en route manuelle du deuxième bassin de filtration, arrêter l'alimentation du bassin filtrant ci-dessus. Fermer l'alimentation électrique et les différentes vannes. Pour la mise en route du deuxième bassin, appliquer la même procédure que ci-dessus.

<p>A - REGARD ARRIVEE DES EAUX USEES</p> 	<p>Vannes batardeaux fermées</p> <p>1 - vanne batardeau pour eaux usées vers rejet dans le désert</p> <p>2 - vanne batardeau pour eaux usées vers dégrillage</p>  <p>Vanne batardeau 2 ouverte</p>
<p>B - DEGRILLAGE</p>	
	<p>(Vanne batardeau A2 ouverte)</p> <p>1 - Arrivée des eaux usées</p> <p>2 - Panier de dégrillage</p> <p>3 - Après dégrillage, envoi des eaux usées vers fosse de réception des eaux usées avec grille de retenue de corps étrangers éventuels</p>

C- BASSIN DE DEGRILLAGE - D'EGOUTTAGE ET FOSSE RECEPTION DES EAUX USEES



- Portique avec poulie pour manutention des bacs d'égouttage
- Bassin d'égouttage
- Bassin de dégrillage
- Siphon de décantation des graisses
- Fosse de réception des eaux usées avec pompes d'aspersion des bassins de filtration

D -FOSSE RECEPTION DES EAUX USEES



- 1 -Pompe 1 du réseau d'aspersion des bassins filtrants
- 2-Pompe 2 du réseau d'aspersion
- 3 -Chaînes de sortie des pompes pour maintenance



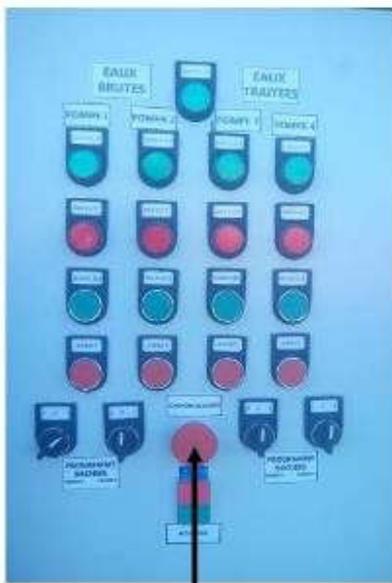
Pompes des eaux usées vers réseaux d'aspersion

E -SIPHON DE SEPARATION DES GRAISSES



Accumulation en surface, des graisses présentes dans les eaux usées. Ces graisses doivent être retirées régulièrement.

F -ARMOIRE ELECTRIQUE



Coupure générale de l'armoire

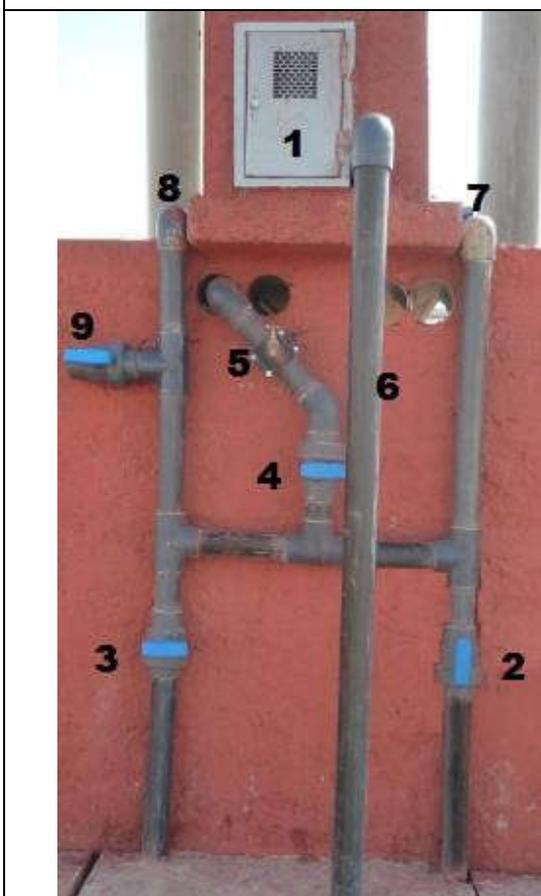


- Disjoncteur général
- Programmateur (bâchées des pompe)
- Contacteurs des pomp
- Relais de surcharge de pompes

**G -ALIMENTATION DES RESEAUX
D'ASPERSION**

**H -VANNES RESEAUX
D'ASPER-SION DESBASSINS
FILTRANTS**

<p>Bassin filtrant Bassin filtrant</p> <p>1 2 1 2 4 3 3</p> <p>Circuit pompe 1 Circuit pompe 2 Circuit eau traitée</p>	<p>POUR BASSIN 1</p> <p>1- Vanne d'arrêt 2- Clapet anti-retour 3- Vanne d'arrêt</p> <p>POUR BASSIN 2</p> <p>1- Vanne d'arrêt 2- Clapet anti-retour 3- Vanne d'arrêt 4 - Robinet de puisage</p>	
		<p>1 - Vanne d'arrêt bassin de filtration 1</p> <p>2 - Vanne d'arrêt bassin de filtration 2</p>

I- RESEAU EAU TRAITEE

- 1 -Coffret raccordement électrique des pompes
- 2 -Vanne d'isolation pompe 2
- 3 -Vanne d'isolation pompe 1
- 4 -Vanne d'isolation réseau nettoyage fosse de réception des eaux usées, du dégrilleur et du bassin d'égouttage.
- 5 -Robinet de puisage
- 6 -Gaine de protection des câbles électriques de raccordement des pompes
- 7 -Canalisation de nettoyage du réseau d'aspersion
- 8 -Canalisation de nettoyage du réseau d'aspersion
- 9 -Vanne en attente pour irrigation