



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université de Larbi Tébessi –Tébessa-

Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie

Département de Biologie Appliquée

MEMOIRE DE MASTER

Domaine: Sciences de la Nature et de la Vie

Filière: Sciences biologiques

Option: pharmaco toxicologie.

Thème

Utilisation des plantes aquatiques pour
la phytoépuration des eaux usées chargés en métaux

Présenté par Présenté par:

Maghzaoui Aya Otmani Manel Bahi Sana

Devant le jury:

Mme Roiuchdeia	universite de larbi tebessi	Président
Mme Boudila	universite de larbi tebessi	Promotrice
Mme Benamara	universite de larbi tebessi	Examinatrice

Date de soutenance : 08/ 06 /2022



Remerciements

Louange à Allah le tout Miséricordieux, le très Miséricordieux ; et prières et salut sur son prophète.

Nos vifs remerciements:

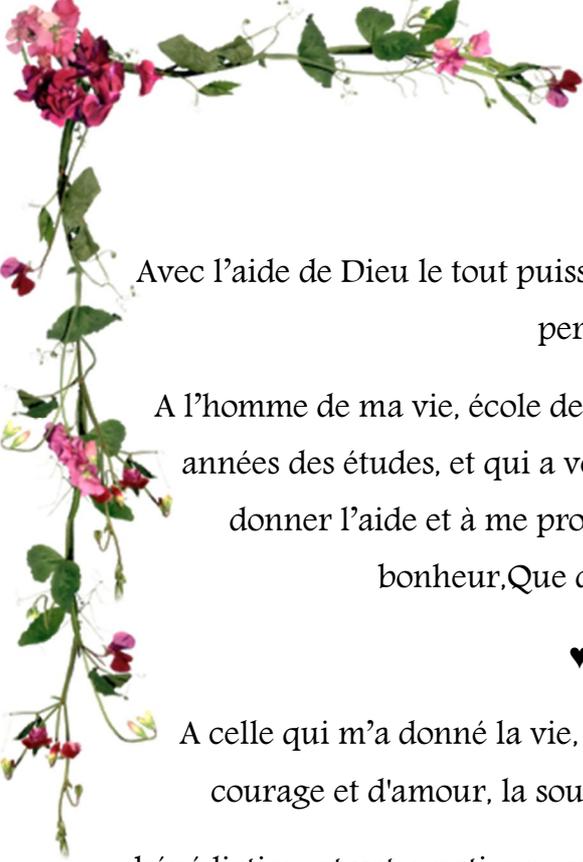
Notre encadreur Mme. BOUADILA Soulef pour ces précieux conseils, ces encouragements et pour avoir approfondi nos connaissances & qui nous a aidées durant toute la période de notre travail, ainsi que pour ses remarques pertinentes et son encouragement.

Mme ROIUCHDIA qui a bien voulu nous honorer en présidant notre jury.

Mme BENAMARA pour avoir accepté de juger et d'évaluer ce modeste travail.

Nos remerciements vont aussi à tous nos professeurs, enseignants et toutes les personnes qui nous ont soutenus jusqu'au bout, et qui n'ont pas cessé de nous donner des conseils très importants en signe de reconnaissance.





Dédicace

Avec l'aide de Dieu le tout puissant est enfin achevé ce travail, lequel je dédie à toutes personnes qui me sont chers:

A l'homme de ma vie, école de mon enfance, qui a été mon ombre durant toutes les années des études, et qui a veillée tout au long de ma vie à m'encourager , à me donner l'aide et à me protéger ,mon soutien moral et source de joie et de bonheur,Que dieux te garde, et te donne longue vie

♥Mon père que j'adore♥

A celle qui m'a donné la vie, la lumière de mes yeux, le symbole de tendresse de courage et d'amour, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur votre bénédiction, et votre patience qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite. Que dieux te garde, te comble de santé, et te donne longue vie

♥Ma chère mère que j'adore♥

♥A mes chères sœurs Houda, Wafa, Imene, Hadjer♥

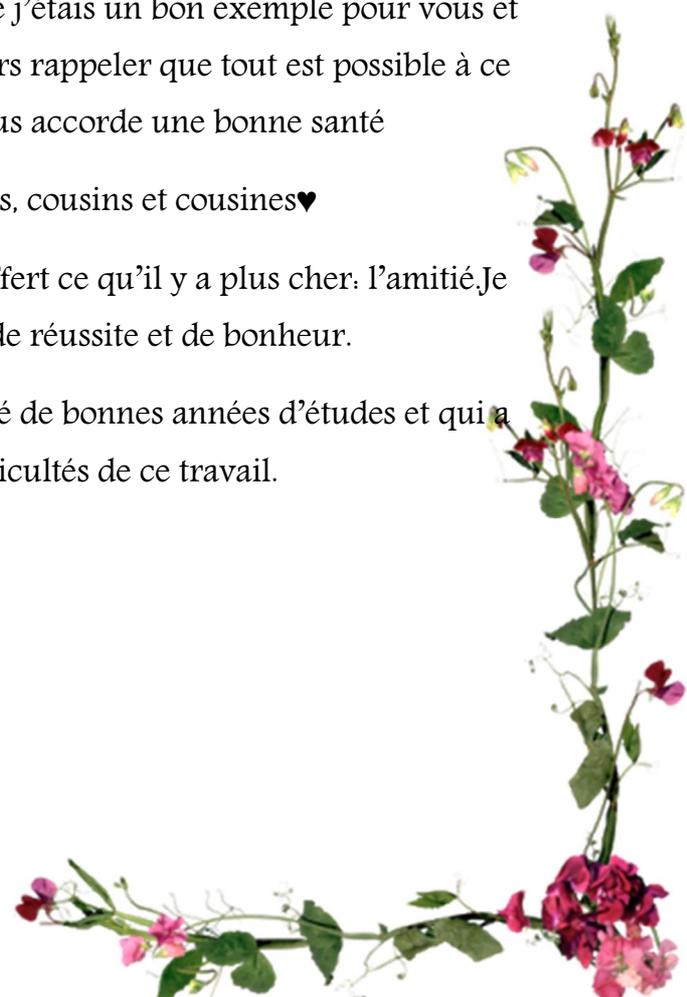
Pour vos encouragements continus, j'espère que j'étais un bon exemple pour vous et que vous aurez fait plus que moi. Il faut toujours rappeler que tout est possible à ce qui croit, que Dieu vous protège et vous accorde une bonne santé

♥A toute ma famille: oncles, tantes, cousins et cousines♥

A mes amies Sabrina, et Warda Vous m'avez offert ce qu'il y a plus cher: l'amitié. Je vous souhaite beaucoup de succès, de réussite et de bonheur.

A mon adorable binôme Aya, Avec qui j'ai passé de bonnes années d'études et qui a enduré avec moi toutes les difficultés de ce travail.

MANEL





Dédicace

A l'aide du Dieu le tout puissant, qui m'a tracé le chemin de ma vie, j'ai pu réaliser ce modeste travail que je dédie à:

♥Mon très cher père FOUAD♥

Qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie .Merci pour l'éducation et le soutien permanent venu de toi .Dieu tout puissant te garde et te procure santé.

♥Ma très chère mère SAMIA♥

Qui a œuvré ma réussite, par son amour, son soutien, tous les sacrifices et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude. Puisse Dieu le tout puissant, te préserver et d'accorder santé, longue vie et bonheur.

♥Ma chère sœur et Mes chères frères♥

AMANI, HAMZA et MOUAD que dieu vous préserve pour moi.

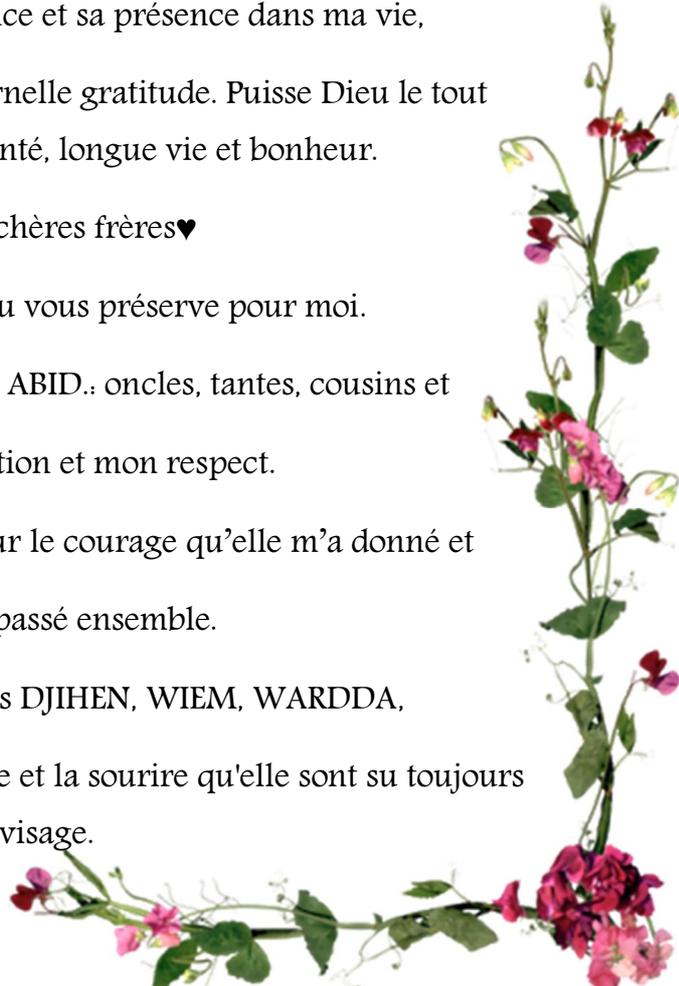
Toute la famille MAGHZAOUI et la famille ABID.: oncles, tantes, cousins et cousines Avec toute mon affection et mon respect.

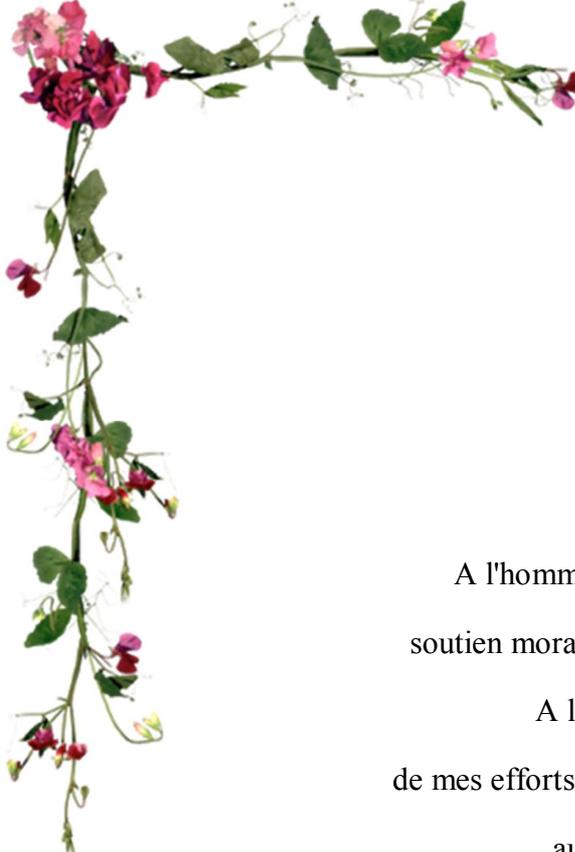
Ma chère binôme MANEL, je la remercie pour le courage qu'elle m'a donné et tous les moments qu'on a passé ensemble.

Mes chères amis et mes chers collègues DJIHEN, WIEM, WARDDA,

Qui m'ont aidé durant toute ma vie est udiantine et la sourire qu'elle sont su toujours dessiner sur mon visage.

AYA





Dédicace

Je dédie ce travail:

A l'homme de ma vie ,mon exemple éternel,mon
soutien moral et source de joie et de bonheur mon père.

A la lumière de mes jours ,la source
de mes efforts ,ma vie et mon bonheur maman qui j'adore.

aux personnes dont j'ai bien aimé

la présésence dans ce jour,à tous mes frères **gholem , wafa ,nadjjet,souad,
laila ,mounia ,houda ,ahlem.**

SANA



Résumé :

L'heure actuelle, la pollution des eaux usées par les éléments traces métalliques est l'un des problèmes environnementaux le plus dangereux. Aujourd'hui, les filtres plantés deviennent une solution importante pour le traitement des eaux usées. Cette méthode appelée phyto-épuration est devenue très répandue dans le monde entier spécialement dans les pays développés. C'est un système innovant, particulièrement efficace, qui utilise le pouvoir épurateur des plantes aquatiques (macrophytes) tolérantes au stress métallique et possédant une capacité d'accumulation et de translocation des métaux et qui offre une alternative écologique, économique, durable et esthétique au système classique.

Mots-clés : les eaux usées, métaux, macrophytes aquatiques, phytoépuration

Abstract:

Currently, pollution of wastewater by metallic trace elements is one of the most dangerous environmental problems. Today, planted filters become an important solution for wastewater treatment. This method called phyto-purification has become very popular all over the world especially in developing countries. It is an innovative, particularly effective system, which uses the purifying power of aquatic plants (macrophytes) tolerant to metal stress and possessing a capacity for the accumulation and translocation of metals and which offers an ecological, economical, durable and aesthetic alternative to classic system.

Keywords: wastewater, metals, aquatic macrophytes, phytoepuration.

المخلص:

في الوقت الحالي ، يعد تلوث المياه العادمة بواسطة العناصر المعدنية النزرية من أخطر المشاكل البيئية ، واليوم ، أصبحت المرشحات المزروعة حلاً مهماً لمعالجة مياه الصرف الصحي ، وقد أصبحت هذه الطريقة التي تسمى التنقية النباتية شائعة جداً في جميع أنحاء العالم وخاصة في البلدان المتقدمة. إنه نظام مبتكر وفعال بشكل خاص، يستخدم قوة تنقية النباتات المائية (macrophytes) التي تتحمل الإجهاد المعدني ولديها القدرة على تراكم المعادن ونقلها ، وتوفر بديلاً بيئياً واقتصادياً ودائماً وجمالياً للنظام الكلاسيكي .

في الوقت الحالي ، يعد تلوث المياه العادمة بواسطة العناصر المعدنية النزرية من أخطر المشاكل البيئية ، واليوم ، أصبحت المرشحات المزروعة حلاً مهماً لمعالجة مياه الصرف الصحي ، وقد أصبحت هذه الطريقة التي تسمى التنقية النباتية شائعة جداً في جميع أنحاء العالم وخاصة في البلدان المتقدمة. إنه نظام مبتكر وفعال بشكل خاص ، يستخدم قوة تنقية النباتات المائية (macrophytes) التي تتحمل الإجهاد المعدني ولديها القدرة على تراكم المعادن ونقلها ، وتوفر بديلاً بيئياً واقتصادياً ودائماً وجمالياً للنظام الكلاسيكي.

الكلمات المفتاحية: مياه الصرف الصحي، المعادن، النباتات المائية الكبيرة، المعالجة بالنباتات

Liste des abréviations

- **MVS** : Matière volatile en suspension.
- **MMS**:Matière minérale en suspension.
- **MES**:Matière en suspension.
- **PH** : potentiel hydrogène.
- **CE** : Conductivité Électrique.
- **DBO5** : Demande biologique en oxygène
- **DCO**:Demande chimique en oxygène.
- **NH3** : Ammoniaque gazeuse dissous
- **NH4+** : Ion ammoniac
- **ETM** :éléments trace métallique.
- **NO₂**: Nitrite.
- **NO₃** :Nitrate
- **P2O5** :Pentoxyde de phosphore
- **EQH** : équivalent habitant
- **CO₂** :gaz de carbone
- **OMS** :Organisation Mondialede la Santé.
- **ASTM**:American Society for Testing Material
- **O₂**: Oxygène
- **MO** :Matière organique
- **PO₄⁻³** :Ortho phosphate
- **T**: Température
- **STEP**: Station d'épuration des eaux usées.
- **JTU** :Jackson Turbidité Unit
- **FTU** :Formazine Turbidity Unit
- **µg** :Microgramme

Table des matières

Résumé

Abstract

المخلص

Remerciement

Dédicaces

Sommaire

Liste des abréviations

Introduction

Chapitre 01 :Généralité sur les eaux usées

Introduction.	01
1- Définition des eaux usées	04
2- Origine et nature de l'eau usée	04
2.1. Eaux usées domestiques	04
2.2. Eaux usées industriels	05
2.3. Eaux usées agricoles	05
2.4. Eaux usées pluviales	05
3- Caractérisation des eaux usées	05
3.1 Paramètres physique	05
3.1.1 Température	05
3.1.2 Les matières en suspension	06
3.2 Paramètres Organoleptiques	06
3.2.1 Turbidité	06
3.2.2 couleur	06
3.3 Paramètres biologique	07
3.4 Paramètres chimique	07
3.4.1 Potentiel hydrogène (pH)	07
3.4.2 Conductivité électrique(CE)	07
3.4.3 Oxygène dissous	07
3.4.4 Demande biochimique en oxygène (DBO5)	08
3.4.5 La demande chimique en oxygène(DCO)	08
3.4.6 l'azote	08
3.4.7 Nitrate	08

3.4.8 L'azote ammoniacal	09
3.4.9 Sulfate	09
3.4.10 Le Phosphore	09
3.4.11 les métaux	10
3.4.11.1 Définition	10
3.4.11.2 Origine	10
3.4.11.2.1 Origine industrielle	10
3.4.11.2.2 Origine agricole	10
3.4.11.2.3 Origine domestique	10
3.4.11.3 Les différents types des métaux	11
3.4.11.3.1 Les métaux toxiques	11
3.4.11.3.2 Les métaux essentiels ou oligoéléments	11
3.4.11.4 toxicité des métaux	12
5- Normes des rejets des eaux usée	12
5.1 Norme international	12
5.2 Norme appliqués en Algérie	13
6- La réutilisation des eaux usées traitées	14
7- Risques de réutilisation des eaux usées.	15
Chapitre 02 :Les plantes aquatiques	
1- Définition des plantes aquatiques	17
2- Rôle des plantes aquatiques macrophytes	18
3- Types des macrophytes	18
3.1 <i>Les hydrophytes</i>	18
3.1.1 <i>Lentille d'eau</i>	19
3.1.2 <i>Nénuphar blanc</i>	19
3.1.3 <i>Nénuphar jaune</i>	20
3.1.4 <i>Le potamot à feuilles nageante</i>	21
3.2 <i>les hélophytes</i>	22
3.2.1 <i>Jonc fleuri ou butome en ombelle</i>	22
3.2.2 <i>Iris des marais</i>	23
3.2.3 <i>Jonc épars</i>	23

3.2.4 <i>Les roseaux communs</i>	24
3.2.5 <i>Les massettes ou massette à feuille larges</i>	25
Chapitre 3 :Traitement des eaux usées	
1- Les étapes des traitements des eaux usées	27
1.1 Le prétraitement	27
1.2 Traitement primaire (décantation primaire)	29
1.3 Traitement secondaire ou traitement biologique	30
1.3.1 Les procédés à cultures libres	30
1.3.2 Les procédés à cultures fixées	32
1.4 Traitement tertiaire	34
2- Traitement des eaux usées par macrophytes (phytoépuration)	34
2.1 Définition de la phytoépuration	34
2.2 Principe de la phytoépuration	35
3 – Les paramètres influençant la phytoépuration	36
4- Types des filtres plantés	38
4.1. Filtres plantés à écoulement vertical	39
4.2 Filtres plantés à écoulement horizontal	40
4.3 Systèmes hybrides	41
5- Avantage et inconvénient de la phytoépuration	42
5.1 Avantage de la phytoépuration	42
5.2 Inconvénients de la phytoépuration	42
6- Conception d'une station par la phytoépuration	42
6.1 Dimensionnement du bassin	43
6.2 Contrôle de la station d'épuration	43
7- Phytoépuration en Algérie	43
Conclusion	46

Introduction

L'eau est un élément biologique important en tant que support de vie et facteur du développement des pays, elle est considérée comme un vecteur privilégié de l'activité humaine (**Gueroui, 2014**).

La qualité des eaux dans le monde a connu ces dernières années une grande détérioration, à cause des rejets industriels non contrôlés et l'utilisation intensive des métaux lourds. Ces derniers produisent une modification chimique de l'eau et la rendent impropre aux usages souhaités (**Lazarine et Lazarine, 2011**).

Les pollutions urbaine, industrielle et agricole sont les causes de la pollution aquatique, par le rejet de nombreux polluants organiques et inorganiques. Cette pollution peut avoir des conséquences sur la santé de l'homme soit par l'ingestion directe des végétaux et animaux contaminés soit par consommation de l'eau.

Tous les éléments traces métalliques sont potentiellement toxiques en fonction de leur concentration dans un milieu et de leur caractère (**Lotmani et Mesnoua, 2011**).

Les traitements des eaux usées sont les processus appliqués dans le but de diminuer la quantité des polluants pour atteindre la norme de rejet des effluents dans le milieu naturel ou de réutiliser des eaux (**Benameur, 2010**).

Plusieurs techniques coûteuses peuvent être utilisées dans l'épuration eaux usées contaminées par les métaux, non conventionnelles, aujourd'hui nous avons besoin de techniques, économiquement compétitives et pouvant préserver les caractéristiques des écosystèmes, comme l'application de la technique simple de la phytoépuration.

Ces systèmes de phyto-épuration sont devenus de plus en plus populaire et actuellement ils font l'objet de recherches intensives (**Seghairi et Debabeche, 2011**).

La phytoépuration est un système de traitements des eaux usées en utilisant le pouvoir épurateur des plantes. Ces dernières consomment les composés polluants dissous dans l'eau (azote et phosphore) qui constituent pour eux des éléments nutritifs. Par ailleurs elles servent de supports à de nombreux organismes microscopiques (algues et bactéries) qui font le gros du travail. Ces plantes sont des mycrophytes ou des macrophytes. Cette technologie est souvent appelée lagunage à mycrophytes ou lagunage aéré et à macrophytes ou filtres plantes (**Tiglyene et al.,2005**).

Notre étude consiste à étudier le pouvoir phytoépuratoire des macrophytes aquatiques des eaux usées chargée aux métaux.

Notre modeste travail est constitué de trois chapitres:

- Le premier chapitre présente des généralités sur les différents types de pollutions des eaux usées essentiellement par les métaux lourds, ainsi que leur origine et leur impact sur la santé humaine et sur l'environnement
 - Le deuxième présente des caractéristiques sur les macrophytes aquatiques.
 - Le troisième chapitre montre les différents procédés de la phytoépuration ainsi quelques études qui sont réalisées en Algérie.
- Enfin, nous terminerons par une conclusion.

Chapitre I

Généralité sur les eaux usées

1- définition des eaux usées :

Une eau est dite usée ou polluée une fois qu'elle perd ses caractéristiques physiques, chimiques et organoleptiques (**Audic, 2006**). La modification défavorable ou nocive de ces propriétés, produite directement ou indirectement par les activités humaines, les rendant impropres à l'utilisation normale. (**Dugniolle et al., 1989**).

Les eaux usées sont des liquides de composition hétérogène, chargées de matières minérales et/ou organiques, pouvant être en suspension ou en solution, et dont certains peuvent avoir un caractère toxique (**Bachi, 2010**).

2- origine et nature de l'eau usée

Suivant l'origine et la qualité des substances polluantes, on distingue quatre (04) catégories d'eaux usées :

2.1. Les eaux usées domestiques.

Ce sont les eaux utilisées par l'homme pour des besoins domestiques (**Chocat, 1997**), elles sont constituées d'une combinaison des eaux domestiques (habitations, bureaux, bains publics) et en moindre quantité d'eaux issues de fonds de commerce et de petites industries.

Les eaux domestiques sont constituées d'eaux de bain, lessive, urines, fèces et résidus alimentaires.

Les eaux commerciales sont issues principalement de lavage de voitures, restaurants, cafés et pressing. Ces eaux sont chargées en matières organiques, graisses et produits d'entretiens ménagers.

Les effluents domestiques sont généralement constitués de matières organiques de bonne biodégradabilité et de matières minérales sous forme dissoute ou en suspension.

Ils constituent l'essentiel de la pollution et proviennent de (**Chocat, Franck, 2002**):

- 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, protéides), et des produits détergents.
- Des eaux de buanderie contenant principalement des détergents.
- Des eaux de salle de bains chargées en produits pour l'hygiène corporelle. Généralement de matières grasses hydrocarbonées.
- Des eaux de vannes qui proviennent des sanitaires (WC), très chargées en matières organiques hydrocarbonées, en composée azotés, phosphorés et en microorganismes.

2.2. Les eaux usées industriels :

Les eaux d'origine industrielles qui sont très différentes des eaux usées domestiques, proviennent des différentes usines de fabrication ou de transformation. Leurs caractéristiques varient d'une industrie à l'autre. elles peuvent être chargées en matières toxiques difficilement biodégradables qui nécessitent un traitement spécifique (**Rodier et al., 2009**).

2.3.. Les eaux usées agricoles :

L'agriculture est une source de pollution des eaux non négligeable car elle apporte les engrais et les pesticides, elle est la cause essentielle des pollutions diffuses (**Metahri, 2012**). Les eaux agricoles issues de terres cultivées chargés d'engrais nitrates et phosphatés, sous une forme ionique ou en quantité telle qu'ils ne seraient pas finalement retenus par le sol et assimilés azotés ou phosphatés des nappes les plus superficielles et des eaux des cours d'eau ou des retenues (**Metahri, 2012**).

2.4.. Les eaux usées pluviale :

Elles peuvent aussi constituer des pollutions importantes des cours d'eau, notamment pendant les périodes orageuses. L'eau de pluie se charge d'impuretés au contact de l'air (fumées industrielles), puis, en ruisselant, des résidus déposés sur les toits et les chaussées des villes (huiles de vidange, carburants, ...). En outre, lorsque le système d'assainissement est dit "unitaire", les eaux pluviales sont mêlées aux eaux usées domestiques (**Desjardins, 1997**).

3-caractérisation des eaux usées :

La composition des eaux usées est extrêmement variable en fonction de leurs origines (industrielle, domestique, etc.); elles peuvent contenir de nombreuses substances, sous forme solide ou dissoute, chimiques, biologiques et des micro-organismes, en fonction de leurs caractéristiques physiques, biologiques et du danger sanitaire qu'elles représentent (**Laabassi, 2016**).

3.1 Paramètres physique:

Une eau usée peut contenir une multitude de paramètres physiques on peut citer :

3.1.1 Température:

Elle joue un rôle dans la solubilité des sels et surtout des gaz, dans la dissociation des sels dissous, donc sur la conductivité électrique, dans la détermination du pH, pour la connaissance de l'origine de l'eau (**Rodier et al., 2005**).

L'augmentation de la température favorise aussi l'auto épuration et accroît la vitesse de sédimentation, ce qui peut présenter un intérêt dans les stations d'épuration (**Djermakoye, 2005**).

3.1.2 Les matières en suspension :

C'est la quantité de pollution organique et minérale non dissoute dans l'eau (**Gomella et Guerree, 1978**). Les MES sont responsable d'ensablement et de baisse de pénétration de la lumière dans l'eau, ce qui entraîne une diminution l'activité photo synthétique et une chute de la productivité du phytoplancton.

Les MES s'expriment par la relation suivante : $MES=30\% MMS + 70\% MVS$.

✓ **Les matières volatiles en suspension (MVS):** Elles présentent environ 70% des MES, elles sont constituées par la partie organique des MES et mesurées par calcination. (**Haoua, 2007**)

✓ **Les matières minérales (MMS):** Elles représentent le résultat d'une évaporation totale de l'eau, c'est-à-dire son «< extrait les chlorures, les phosphates, etc >>, constitué à la fois par les matières en suspension et les matières solubles telles que les chlorures, les phosphates, etc. (**Haoua, 2007**).

3.2 Paramètres Organoleptiques:

3.2.1 La Turbidité :

Selon **Rejsek (2002)**, la turbidité représente l'opacité d'un milieu trouble. C'est la réduction de la transparence d'un liquide due à la présence de matières non dissoutes. Elle est causée, dans les eaux, par la présence de matières en suspension (MES) fines, comme les argiles, les limons, les grains de silice et les microorganismes. Une faible part de la turbidité peut être due également à la présence de matières colloïdales d'origine organique ou minérale. Les unités utilisées pour exprimer la turbidité proviennent de la normalisation ASTM (American Society for Testing Material) qui considère que les trois unités suivantes sont comparables :

Unité JTU (Jackson Turbidity Unit) = unité FTU (Formazine Turbidity Unit) = unité NTU (Nephelometric Tirbidity Unit).

3.2.2 La couleur:

Une eau pure observée sous une lumière transmise sur une profondeur de plusieurs mètres émet une couleur bleu clair car les longueurs d'ondes courtes sont peu absorbées alors que les grandes longueurs d'onde (rouge) sont absorbées très rapidement (**Rejsek, 2002**).

La coloration d'une eau est dite vraie ou réelle lorsqu'elle est due aux seules substances en solution. Elle est dite apparente quand les substances en suspension y ajoutent leur propre coloration. (Rodier *et al.*, 2005).

3.3 Paramètres biologiques :

Toutes les eaux sont susceptibles d'être polluées par des micro-organismes. L'eau destinée à l'utilisation par l'homme doit être autant que possible indemne de contamination par des bactéries ou des virus pathogènes. Il s'agit de la pollution par des micro-organismes (bactéries, virus, parasites, champignons, efflorescences planctoniques, etc.) Les germes pathogènes pour l'homme sont nombreux et de détermination délicate, au fait de leur faible concentration dans les eaux. Aussi, compte tenu de l'origine intestinale préférentielle des bactéries et des virus pathogènes des eaux, d'une part, et d'autre part, de l'élimination massive de commensaux de l'intestin par chacun des individus d'une population donnée (Kesbi, 2016).

3.4 Paramètres chimique:

3.4.1 Potentiel hydrogène (pH):

L'acidité, la neutralité ou l'alcalinité d'une solution aqueuse peut s'exprimer par la concentration en H_3O^+ (notée H^+ pour simplifier). De manière à faciliter cette expression on utilise le logarithme décimal de l'inverse de la concentration en ion H^+ : c'est le pH

$$pH = \log 1/[H^+]. \text{ (Mathieu et Pieltain, 2003).}$$

Le pH joue un rôle important dans l'épuration d'un effluent et le développement bactérien, la nitrification optimale ne se fait qu'à des valeurs de pH comprises entre 7,5 et 9 (Metahri, 2012).

3.4.2 Conductivité électrique(CE):

La conductivité est la propriété que possède une eau de favoriser le passage d'un courant électrique. Elle est due à la présence dans le milieu d'ions qui sont mobiles dans un champ électrique. Elle dépend de la nature de ces ions dissous et de leurs concentrations. (Rejesk, 2002).

La conductivité électrique d'une eau est la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes métalliques de 1 cm^2 , et l'unité de la conductivité est le siemens par mètre (S/m). (Rodier, 2005).

3.4.3 Oxygène dissous:

L'oxygène dissous est un composé essentiel de l'eau car il permet la vie de la faune

et il conditionne les réactions biologiques qui ont lieu dans les écosystèmes aquatiques.

La solubilité de l'oxygène dans l'eau dépend de différents facteurs, dont la température, la pression et la force ionique du milieu.

La concentration en oxygène dissous est exprimée en mg O₂ L⁻¹ (**Rejsek, 2002**).

3.4.4 Demande biochimique en oxygène (DBO₅):

charge du milieu considéré en substances putrescibles, son pouvoir auto-épurateur et d'en déduire la charge maximale acceptable, principalement au niveau des traitements primaires des stations d'épuration. La demande biochimique en oxygène après 5 jours (DBO₅) d'un échantillon est la quantité d'oxygène consommé par les micro organismes aérobies présents dans cet échantillon pour l'oxydation biochimique des composés organiques et/ou inorganiques (**Haoua, 2007**).

3.4.5 La demande chimique en oxygène (DCO):

La Demande Chimique en Oxygène (DCO) est la mesure de la quantité d'oxygène nécessaire pour la dégradation chimique de toute la matière organique biodégradable ou non biodégradable contenue dans les eaux à l'aide du bichromate de potassium à 150°C. Elle est exprimée en mg O₂/l. (**Suschka et Ferreira, 1986**).

3.4.6 L'azote:

L'azote présent dans l'eau peut avoir un caractère organique ou minéral. L'azote organique est principalement constitué par des composés tels que des protéines, des polypeptides, des acides aminés, de l'urée. Le plus souvent ces produits ne se trouvent qu'à de très faibles concentrations. Quant à l'azote minéral (ammoniaque, nitrate, nitrite), il constitue la majeure partie de l'azote total. (**Rodier et al., 2005**).

3.4.7 Nitrate:

Les nitrates se trouvant naturellement dans les eaux provenant en grande partie de l'action de l'écoulement des eaux sur le sol constituant le bassin versant. Leurs concentrations naturels ne dépassent pas 3 mg /l dans les eaux superficielles et quelques mg/L dans les eaux souterraines. La nature des zones de drainage joue donc un rôle essentiel dans leur présence et l'activité humaine accélère le processus d'enrichissement des eaux en nitrates.

L'augmentation de la concentration des nitrates à plusieurs origines:

- ❖ Agricole : agriculture intensive avec utilisation massive d'engrais azoté ainsi que rejets d'effluents d'élevage.

❖ Urbaine : rejet des eaux épurées des stations d'épuration où l'élimination de l'azote n'est pas totale et qui peuvent rejeter des nitrates ou des ions ammonium qui se transformeront en nitrates dans le milieu naturel.

❖ Industrielle : rejet des industries minérales, en particulier de fabrication des engrais azotés (**Rejsek, 2002**).

3.4.8 L'azote ammoniacal:

Pour désigner l'azote ammoniacal, on utilise souvent le terme d'ammoniaque qui correspond aux formes ionisées (NH_4^+) et non ionisées (NH_3) de cette forme d'azote. L'ammoniaque constitue un des maillons du cycle de l'azote. Dans son état primitif, l'ammoniac (NH_3) est un gaz soluble dans l'eau, mais, suivant les conditions de pH, il se transforme soit en un composé non combiné, soit sous forme ionisée (NH_4^+).

Les réactions réversibles avec l'eau sont fonction également de la température et sont les suivantes :



3.4.9 Sulfate:

La présence de sulfate dans l'eau est généralement due à des rejets en provenance d'ateliers de blanchiment (laine, soie, etc.), d'usines de fabrication de cellulose (pâte à papier, etc.) et d'unités de décoloration. Sont utilisées, par ailleurs, les propriétés réductrices des sulfites dans les eaux de chaudières pour éviter la corrosion liée à la présence d'oxygène dissous ; l'injection dans le circuit se fait habituellement en continu à la concentration de 20 mg/L. Cependant un excès d'ions sulfites dans les eaux de chaudières peut avoir des effets néfastes car il abaisse le pH et peut alors développer la corrosion. En cas de rejet dans l'environnement, les sulfites se combinent à l'oxygène en donnant des sulfates. (**Rodier, 2005**).

3.4.10 Le Phosphore:

Dans les eaux résiduaires, le phosphore peut se rencontrer sous forme de sels minéraux (ortho phosphates, poly phosphates) mais aussi sous forme de composés organiques, ces différents composés sont soit solubilisés, soit fixés sur les matières en suspension (Rodier et al., 2009). L'hydrolyse en milieu acide fait apparaître le phosphore hydrolysable, le phosphore organique ainsi chaque fraction (phosphore en solution ou en suspension) peut être séparée analytiquement en ortho phosphates, phosphore hydrolysable et phosphore organique.

Suivant les cas, la teneur en phosphates peut être exprimée en mg /l de PO₄ ou de P₂O₅ (1mg /l de PO₄= 0,747 mg/l de P₂O₅= 0,326 mg/l de P) (Rodier *et al.*, 2005).

3.4.11 les métaux:

3.4.11.1 Définition:

Dans le cadre de chimie, les métaux lourds sont généralement définis sur la base de leurs propriétés physico-chimiques. En science du sol, il est convenu de parler "d'éléments trace métalliques" qui désignent des composés minérales présents à très faible concentration.

En toxicologie, ils peuvent être définis comme des métaux à caractère cumulatif (souvent dans les tissus biologiques) ayant essentiellement des effets très néfastes sur les organismes vivants. En nutrition et en agronomie, ils peuvent même être assimilés à des oligo-éléments indispensables à certains organismes, en particulier par leur action catalytique au niveau du métabolisme (Adriano, 2001).

Un métal est une matière, issue le plus souvent d'un minerai ou d'un autre métal, dotée d'un éclat particulier, bon conducteur de chaleur et d'électricité, ayant des caractéristiques de dureté et de malléabilité, se combinant ainsi aisément avec d'autres éléments pour former des alliages utilisables dans l'industrie(Gérard, 2001).

3.4.11.2 Origine des métaux:

3.4.11.2.1 Origine industrielle:

Pendant de nombreuses années, les industries situées à proximité de cours d'eau (pour des raisons de refroidissement et de transport) y ont rejeté leurs effluents.

Les éléments nocifs les plus importants sont les métaux lourds. Le cuivre, le zinc, le cadmium, le chrome, le plomb, le mercure, le nickel.(Bachi, 2010).

3.4.11.2.2 Origine agricole:

Les activités agricoles sont également à l'origine d'une contamination de l'environnement.

Le Sulfate de cuivre (bouillie bordelaise) est utilisé pour traiter les vignes et les arbres fruitiers.L'arséniate de plomb ou des dérivés mercuriels ont été utilisés dans le passé comme pesticides. Certains engrais, fabriqués à partir de minerais riches en phosphates, peuvent aussi avoir de fortes Concentrations en cadmium présent en impureté (Lombi *et al.*,2000).

3.4.11.2.3 Origine domestique :

Les métaux proviennent des différents usages domestiques de l'eau, elles se répartissent en eaux ménagères (eau de salle de bain et cuisine) qui sont généralement chargées de détergents, de solvants, de graisses et de débris organiques. Il s'agit aussi des rejets des toilettes, auxquels peuvent s'ajouter selon l'importance et le type d'agglomération. les eaux usées d'ensembles collectifs (Hôpitaux, Ecoles et parkings) et celles des activités artisanales et commerciales (cabinets médicaux, pharmacie, ateliers photo et ateliers de tôlerie) ou urbaine qui sont à l'origine de la corrosion des conduites, dans les réseaux intérieurs des immeubles et au niveau des branchements entre le réseau public et le compteur de l'abonné, qui est la source d'une fraction importante de la charge en cuivre et plomb des eaux usées, le ruissellement des eaux pluviales sur les toitures, les chaussées et d'une manière générale sur l'ensemble des surfaces imperméables de la cité qui conduit à l'enrichissement en plomb, zinc et nickel de l'effluent. (Baltzer, 1993).

3.4.11.3 Les différents types des métaux:

D'un point de vue biologique, on distingue deux types en fonction de leurs effets physiologique et toxique : métaux toxiques et métaux essentiels (Huynh, 2009).

3.4.11.3.1 Les métaux toxiques:

Tout élément est toxique quand il est absorbé en excès par rapport à la capacité d'assimilation de l'organisme (Baath, 1992).

3.4.11.3.2 les métaux essentiels ou oligoéléments:

Sont des éléments indispensables à l'état de traces pour de nombreux processus cellulaires et qui se trouvent en proportion très faible dans les tissus biologiques (Loué, 1993).

Certains peuvent devenir toxiques lorsque la concentration dépasse un certain seuil. C'est le cas du cuivre, nickel, zinc, et du Fer (Kabata et Pendas, 2001).

Le tableau suivant présente les principaux éléments métalliques essentiels et non essentiels.

Tableau01: Principaux éléments métalliques essentiels et non-essentiels (Hopkin, 1989).

<u>Eléments essentiels</u> <u>majeurs</u>	<u>Oligo-éléments</u> <u>essentiels</u>	<u>Eléments "essentiels"</u> <u>en ultra trace</u>	<u>Eléments non</u> <u>essentiels</u>
Calcium Phosphore Potassium Soufre Magnésium Chlore Sodium	Fer, Iode, Cuivre, Manganèse, zinc, Cobalt, Molybdène, Sélénium, Chrome, Nickel, Vanadium, Silicone, Arsenic	Lithium Fluor Aluminium Étain Plomb (Cadmium)* *essentiel si déficit de Zinc	Cadmium, Mercure

3.4.11.4 Toxicité des métaux :

Une des principales conséquences de la présence des métaux dans l'eau est leur passage dans la biomasse. Ce transfert peut enchaîner des toxicités directes qui se manifestent rapidement par une atteinte de la biomasse, ou indirectes qui sont liées à l'accumulation progressive de ces métaux par les organismes (**Ramade, 2000**).

Les composés métalliques ont une toxicité variable selon leur nature et leur voie de pénétration (ingestion, respiration, contact avec la peau) (**Chiffolleau et al., 2001**).

On distingue 3 formes différentes de toxicité: aiguë provoquant la mort ou de graves troubles physiologiques, subaiguë et à long terme.

De plus, la toxicité d'un métal est déterminée par la nature chimique de l'environnement aqueux et par la spéciation des ETM (forme chimique sous laquelle le métal est considéré: minérale, organique, complexe ou chélatée) (**Ben Salem, 2014**).

5- normes des rejets des eaux usées:

Les normes de rejet sont des valeurs des paramètres polluants d'une eau usées à ne pas dépasser. On distingue:

5.1 normes international:

Les normes internationales selon l'organisation mondiale de la santé pour les eaux usées sont présentées dans le tableau.

Tableau 02 Normes de rejets internationaux (Medjdoub, 2014) :

Caractéristiques	Unité	Normes Utilisées (OMS)
pH	-----	6,5-8,5
DBO5	mg/L	< 30
DCO	mg/L	< 90
MES	mg/L	< 20
NH+4	mg/L	< 0,5
NO2	mg/L	1
NO3	mg/L	< 1
P2O5	mg/L	< 2
Température	°C	< 30
Couleur	-----	Incolore
Odeur	-----	Incolore

5.2 Normes appliqués en Algérie:

Selon les normes Algériennes les valeurs limites maximales de rejet d'effluents sont regroupées dans le tableau.

Tableau:03 Normes de rejets dans un milieu récepteur (Aanat, 2008).

Paramètres	Unités	Valeurs limites	Paramètres	Unités	Valeurs limites
Température	°C	30	Aluminium	mg/L	03
pH	----	6,5 à 8,5	Cadmium	mg/L	0,2
MES	mg/L	35	Fer	mg/L	03
DBO5	mg/L	35	Manganèse	mg/L	01
DCO	mg/L	120	Mercure Total	mg/L	0,01
Azote Kjeldahl	mg/L	30	Nickel total	mg/L	0,5
Phosphates	mg/L	02	Plomb total	mg/L	0,5
Phosphore Total	mg/L	10	Cuivre total	mg/L	0,5
Cyanures	mg/L	0,1	Zinc total	mg/L	03
Huiles et Graisses	mg/L	20	(*) Chrome III +	mg/L	03
Hydrocarbures Totaux	mg/L	10	(*) Chrome VI +	mg/L	0,1
Indice Phénols	mg/L	0,3	(*) Solvants organiques	mg/L	20
Composés organiques chlorés	mg/L	05	(*) Chlore Actif	mg/L	1,0
Chrome total	mg/L	0,5	(*) Détergents	mg/L	2

6- La réutilisation des eaux usées traitées:

La réutilisation des eaux usées épurées en l'agriculture, l'industrie et les usages domestiques dans le monde couvrent respectivement 70%, 20%, 10% de leur demande en eau, cette technique d'irrigation est utilisée essentiellement dans les pays réputés agricoles dont les ressources hydriques sont faibles comme le bassin méditerranéen et le Sud des États-Unis (Ecosse, 2001).

Pendant les dernières années, la réutilisation des eaux usées a connu un développement très rapide avec une croissance des volumes d'eaux usées réutilisées de l'ordre de 10 à 29 % par an, en Europe, aux États Unis et en Chine, et jusqu'à 41% en Australie, le volume journalier actuel des eaux réutilisées atteint le chiffre impressionnant de 1,5-1,7 millions de m³ par jour dans plusieurs pays, comme par exemple en Californie, en Floride, au Mexique et en Chine (Lazarova et Brissaud, 2007).

L'Algérie, pays semi-aride, avait fait face à une sécheresse. Aujourd'hui la stratégie nationale du développement durable se matérialise particulièrement à travers un plan

stratégique qui réunit trois dimensions à savoir; Sociale, Economique et Environnementale (MRE, 2012). L'Algérie dispose de 134 stations d'épuration (STEP et lagunes) en fonctionnement avec une capacité installée estimée à 12 millions EQH (équivalent habitant) soit 800 hm³/an, la réutilisation des eaux usées épurées notamment à des fins agricoles est devenue l'un des axes principaux de la stratégie du secteur des ressources en eau en Algérie (**Hannachi et al., 2014**).

7- Risques de réutilisation des eaux usées:

Les risques liés à la réutilisation des eaux usées en agriculture sont multiples et de nature microbiologique, chimique ou environnementale. La plus grande préoccupation associée à la réutilisation des eaux usées, même traitées, est la transmission potentielle de maladies infectieuses, essentiellement, les pathogènes entériques où plusieurs pathogènes potentiellement présent dans les eaux usées brutes (**USEPA, 2004**).

Devaux (1999), recense quatre études traitant des risques posés par la consommation des végétaux irrigués par les eaux usées brutes.

Des infections parasitaires dues aux ascaris, aux tricho céphales et aux bactéries ont été observées chez les consommateurs des produits végétaux infectés. Le risque de contamination est élevé dans le cas de la réutilisation des eaux usées brutes comparativement à l'utilisation des eaux usées traitées (**Devaux, 1999**). **Cauchi (1996)** a cité les différentes populations humaines exposées à une pathologie associée à l'utilisation agricole d'effluents bruts ou traités. Le risque, pour les consommateurs de légumes crus, est plus élevé pour les helminthes et moindre pour les bactéries.

Quelques études menées sur le risque sanitaire pour le personnel font ressortir que ce risque n'est pas plus élevé que pour le personnel travaillant sur les stations d'épuration (**Maait, 1997**).

En cas des travailleurs agricoles, le risque est plus élevé pour les helminthes. En laboratoire, il a été mis en évidence que l'exposition aux entérovirus est plus élevée, même si sur le terrain il n'y a pas eu d'augmentation de cas cliniques; 6 études listées par Devaux montrent que les travailleurs agricoles sont légèrement plus exposés que la population normale ou que les personnels de station d'épuration et les égoutiers; les nouveaux travailleurs sont plus sensibles que les anciens: il semble y avoir une adaptation immunitaire aux bactéries et aux virus (**Baumont et al., 2004**).

.

Chapitre II

Les plantes aquatiques (macrophytes)

Les plantes aquatiques visibles à l'oeil nu sont appelées plantes « macrophytes », contrairement aux algues qui sont difficiles à identifier à l'oeil nu, d'où l'importance d'en faire la distinction.

1- définition des macrophytes:

En 1977, Holmes et Whitton se penchent sur l'étude de végétaux aquatiques macroscopiques, observables à l'oeil nu et facilement identifiables à l'observation. C'est ainsi qu'ils définissent les macrophytes aquatiques. Cette définition est essentiellement portée sur la taille de l'organisme sans aucune distinction d'ordre taxonomique. Plus tard, **(Wiegand, 1988)** apporte une nuance liée à la caractéristique aquatique du milieu et précise les taxa concernés :« les macrophytes aquatiques désignent des végétaux macroscopiques se développant entièrement ou partiellement dans un milieu aquatique ».

La plupart des plantes aquatiques macrophytes sont composées de racines, de tiges et de feuilles. Toutefois, il arrive que certaines plantes aquatiques macrophytes ne possèdent pas de racines et dérivent au gré des courants, comme la lentille d'eau (*Lemna minore*) **(Fischesser et Dupuis, 2007)**.

En fonction de l'inféodation à l'eau, on distinguera les macrophytes réellement aquatiques ou hydrophytes, les végétaux qui poussent “ les pieds dans l'eau ” ou héliophytes **(Holmes et Whitton, 1977)**.

(Haury, 1992) propose une classification synthétique de ces types éco-morphologiques en prenant en compte les relations entre la morphologie des végétaux, les conditions de submersion et leur relation au substrat.

2- Rôle des plantes aquatiques macrophytes:

Tableau04: Les rôles des différentes parties des macrophytes (**Sciences Eaux et Territoires, 2014**).

Partie des plantes	Rôle
Partie aérienne.	Atténuation de la lumière, réduction de la photosynthèse dans les eaux.
	Influence du microclimat, isolation (hiver ou été).
	Réduction de la vitesse du vent et du risque de remise en suspension des sédiments.
	Évapotranspiration estivale.
	Aspect esthétique positif du système.
Racine et rhizomes dans les sédiments ou les dépôts de surface.	Stabilisation de la surface des sédiments, réduction de l'érosion.
	Prévention du colmatage dans les systèmes à écoulements verticaux, effet de filtre des gros déchets.
	Augmentation de surface de contact pour les développements bactériens
	Libération d'oxygène augmentant la nitrification et la dégradation bactérienne.
	Production d'antibiotiques, de phytométallophores et de phytochélatines.
	Absorption des éléments nutritifs.

3- Type des macrophytes:

3.1 Les hydrophytes:

Plantes aquatiques dont l'appareil végétatif se développe entièrement dans l'eau ou à sa surface (**Lazarine et Lazarine, 2011**). Comprenant les espèces totalement submergées (se reproduisant dans l'eau) ou ayant des feuilles flottantes (développant leur appareil végétatif dans la colonne d'eau ou à sa surface). Ces dernières peuvent être ancrées au fond ou flotter librement (captant directement les nutriments dans l'eau) (**Haury, 1992**).

3.1.1 Lentille d'eau:

✚ Systématique:

Règne : *Plantae*

Classe : *angiosperme*

Classe : *monocotylédones*

Ordre : *Alismatales*

Famille : *Araceae*

Sous-famille : *Lemnoideae*

Genre : *Lemna*

Espèce : *Lemna minor* (wikipedia, 2022).



Figure 01: *Lemnaminor* (Wikipédia, 2022).

✚ Description:

La lentille d'eau forme de grands tapis à la surface des eaux stagnantes. Ses frondes sont très fines et parfois teintées de rouges. Elle est très utile pour couvrir la surface des points d'eau en été qu'elle protège ainsi de l'ensoleillement et donc du réchauffement (Lazarine et Lazarine, 2011).

✚ Habitat:

La lentille d'eau se multiplie très facilement, en prélevant et en disséminant de petites colonies dans des eaux stagnantes.

Elle apprécie particulièrement les eaux calcaires, et les taux élevés de nitrate ne pourront que la faire prospérer. Résistante à des températures basses (Lazarine et Lazarine, 2011).

3.1.2 Nénuphar blanc:

✚ Systématique:

Règne : *Plantae*

Sous règne : *Tracheobionta*

Division : *Magnoliophyta*

Classe : *Magnoliopsida*

Sous-classe : *Magnoliidae*

Ordre : *Nymphaeales*

Famille : *Nymphaeaceae*

Genre : *Nymphaea*

Espèce : *Nymphaea alba* (wikipedia, 2022).



Figure 02 : *Nymphaea alba* (Wikipédia, 2022).

✚ Description:

Feuilles larges, suborbiculaires en coeur, fleurs blanches, rarement roses, grandes, flottantes, à odeur suave (**Tela Botanica, 2020**).

✚ Habitat:

La Nénuphar blanc s'enracine dans la vase peu profonde (moins d'un mètre) des secteurs abrités des lacs, étangs et tourbières où ils créent un magnifique tapis flottant. Leurs colonies, parfois très étendues, sont parfois envahissantes (**Fleurbec, 1987**).

3.1.3 Nénuphar jaune:

✚ Systématique:

Règne : *Plantae*

Sous règne : *Tracheobionta*

Division : *Magnoliophyta*

Classe : *Magnoliopsida*

Sous classe : *Magnoliidae*

Ordre : *Nymphaeales*

Famille : *Nymphaeaceae*

Genre : *Nymphaea*

Espèce : *Nymphaealutea* (**wikipedia, 2022**).



Figure 03 : *Nymphaealutea* (**Wikipédia, 2022**).

✚ Description:

Les nénuphars sont des plantes aquatiques flottantes fréquentes dans les eaux tranquilles (**Fleurbec, 1987**). Il s'agit d'une espèce vigoureuse, dont le feuillage orbiculaire flotte à la surface des eaux peu courantes. En été, des fleurs solitaires jaune à orange émergent de l'eau (**Lazarine et Lazarine, 2011**).

Le grand nénuphar jaune possède des feuilles et des fleurs plus grandes que son frère, moins abondant, le petit nénuphar jaune (**Fleurbec, 1987**).

✚ Habitat:

On les retrouve habituellement à une profondeur de 0,5 à 1,5 mètre. Ils apprécient plus particulièrement les fonds vaseux des eaux oligotrophes, sans pour autant renier les eaux eutrophes (**Fleurbec, 1987**).

La multiplication de ce nénuphar se fait par division printanière. Il préfère la zone ombragée, le substrat riche et tolère des zones de faibles courants. Résistante à des températures très basses (**Lazarine et Lazarine, 2011**).

3.1.4 Le potamot à feuilles nageante:

✚ Systématique:

Règne : *Plantae*

Sous règne : *Tracheobionta*

Division : *Magnoliophyta*

Classe : *Liliopsida*

Sous classe : *Alismatidae*

Ordre : *Najadales*

Famille : *Potamogetonaceae*

Genre : *Potamogeton*

Espèce : *Potamogeton natans* (wikipedia, 2022).



Figure04 : *Potamogeton natans* (Wikipédia, 2022).

✚ Description:

. Cette plante possède deux types de feuilles. Les premières sont submergées, alors que les deuxièmes flottent à la surface de l'eau. Les feuilles submergées restent rigides et assez pointues, alors que les flottantes sont plus arrondies. Les tiges cylindriques sont souvent tachetées de rouille et partent d'un rhizome qui se trouve assez profondément dans le substrat. Cette plante produit des épis cylindriques qui sortent de l'eau (Lapointe *et al.*, 2014).

✚ Habitat:

Eaux peu profondes des marais, étang et lac. Préfère les substrats vaseux avec beaucoup de matière organique (Lapointe *et al.*, 2014).

Les potamots supportent les eaux légèrement courantes, ils préfèrent les expositions ensoleillées. L'hiver certains peuvent supporter des températures inférieures à -15°C (Lazarine et Lazarine, 2011).

3.2 Les helophytes :

Composés par les plantes dont les racines et la base de la tige se trouvent presque constamment immergées mais dont les feuilles et les inflorescences s'élèvent au-dessus de l'eau (Haury, 1992).

3.2.1 Jonc fleuri ou butome en ombelle:

✚ Systématique:

Règne : *Plantae*

Sous règne : *Tracheobionta*

Division : *Magnoliophyta*

Classe : *Liliopsida*

Sous classe : *Alismatidae*

Ordre : *Alismatales*.

Famille : *Butomaceae*

Genre : *Butomus*

Espèce : *Butomus umbellatus* (wikipedia, 2022).



Figure05 : *Butomus umbellatus* (Wikipédia, 2022).

✚ Description:

Plante vivace de 40-80 cm, verte, à rhizomes traçants, tiges nues, lisses sur le frais, finement striées sur le sec, faciles à rompre, à moelle continue, rarement creuses (Tela Botanica, 2020).

✚ Habitat:

Le jonc fleuri exige d'avoir les pieds dans l'eau pour prospérer. Il apprécie l'exposition ensoleillée. Il craint les gelées au-delà de -10C°. Il peut être multiplié par semis, mais la division des touffes s'avère plus efficace. (Lazarine et Lazarine, 2011).

3.2.2 Iris des marais:

✚ **Systématique:**

Règne : *Plantae*

Sous-règne : *Tracheobionta*

Division : *Magnoliophyta*

Classe : *Liliopsida*

Sous-classe : *Liliidae*

Ordre : *Liliales*

Famille : *Iridaceae*

Genre : *Iris*

Espèce : *Iris pseudacorus*

Nom commun : Iris des marais, Iris jaune, Iris faux acore (**Wikipédia, 2022**).



Figure06 : *Iris pseudacorus* (wikipedia, 2022).

✚ **Description:**

Plante vivace de 40 cm à 1 mètre, glabre, inodore, à rhizome épais feuilles en glaive, égalant presque la tige rameuse au sommet et arrondie-comprimée (**Tela Botanica, 2020**).

✚ **Habitat:**

Une fois installé, l'iris peut s'étaler et devenir envahissant. Il est conseillé de le planter en automne, dans un contenant. Il prospère au soleil, et dans une terre riche et fertile (**Lazarine et Lazarine, 2011**).

3.2.3 Jonc épars:

✚ **Systématique:**

Règne : *Plantae*

Sous-règne : *Tracheobionta*

Division : *Magnoliophyta*

Classe : *Liliopsida*

Sous-classe : *Commelinidae*

Ordre : *Juncales*

Famille : *Juncaceae*

Genre : *Juncus*

Espèce : *Juncus effusus* (**wikipedia, 2022**).



Figure07 : *Juncus effusus* (wikipedia, 2022).

+ Description:

Cette plante produit de gros rhizomes ramifiés et pousse en touffes très denses. Les tiges sont flexibles et peuvent atteindre un mètre trente. On retrouve les feuilles à la base de la plante sous forme de gaines rougeâtres.

Au deux tiers de la tige on retrouve les inflorescences retombantes formées par une bractée cylindrique brune. Cette plante est une source de nourriture pour la sauvagine ainsi que pour les orignaux (**Lazarine et Lazarine, 2011**).

+ Habitat:

Marais, marécage, prairie humide, rivage et fossé. (**Lapointe et al., 2014**).Préfère une température supérieur à -15C° (**Lazarine et Lazarine, 2011**).

3.2.4 Les roseaux communs:

+ Systématique:

Règne : *Plantae*

Sous-règne : *Tracheobionta*

Division : *Magnoliophyta*

Classe : *Liliopsida*

Sous-classe : *Commelinidae*

Ordre : *Cyperales*

Famille : *Poaceae*

Genre : *Phragmites*

Espèce : *Phragmites australis* (**wikipedia, 2022**).



Figure08: *Phragmites australis* (**Wikipédia, 2022**).

+ Description:

Le roseau commun est haut de 3m. Son inflorescence est violette en été, puis jaune doré à l'automne. Elle peut mesurer jusqu'à 40cm. Son inflorescence est une panicule plumeuse de couleur rouge à brun. La tige non ramifiée porte des feuilles longues et planes (**Gagnon, 2012**).

+ Habitat:

C'est une plante qui résiste aux milieux les plus argileux est rocailleux, facile à implanter en milieux marécageux (**Fauteux, 2002**).

Le roseau commun, pour sa part est presque complètement cosmopolite (**Gagnon, 2012**).

3.2.5 Les massettes ou massette à feuille larges:

✚ **Systématique:**

Règne : *Plantae*

Sous-règne : *Tracheobionta*

Division : *Magnoliophyta*

Classe : *Liliopsida*

Sous-classe : *Commelinidae*

Ordre : *Typhales*

Famille : *Typhaceae*

Genre : *Typha*

Espèce : *Typha latifolia* (wikipedia, 2022).



Figure09 : *Typha latifolia* (wikipedia, 2022).

✚ **Description:**

Cette espèce atteint régulièrement 3m de haut. Elle forme de grandes touffes de feuilles mesurant jusqu'à 2 cm de large (Lazarine et Lazarine, 2011).

La hauteur de la tige varie entre 100 à 270 cm et la taille de la feuille entre 6 à 25 mm.

Sans aucun parfum ni nectar, elles se décrivent comme étant linéaire, avec des épis staminés et une floraison estivale. Ces plantes produisent beaucoup de biomasse et leurs longues tiges assurent l'oxygénation du substrat (Gagnon, 2012).

✚ **Habitat:**

Elles proviennent des régions tempérés et chaudes des deux hémisphères et on les retrouve particulièrement en Europe, en Asie et en Amérique. Elles colonisent les marais et les rivages saturés en eau douce (Gagnon, 2012)

Chapitre III

Traitement des eaux usées

Chapitre 3: Traitement des eaux usées

1- Les étapes des traitements des eaux usées:

Selon le degré d'élimination de la pollution et les procédés mis en œuvre, plusieurs niveaux de traitements sont définis: les prétraitements, le traitement primaire et le traitement secondaire; dans certains cas les traitements tertiaires sont nécessaires, notamment lorsque l'eau épurée doit être rejetée en milieu particulièrement sensible (**Metahri, 2012**).

1.1 Le prétraitement:

La première étape du traitement consiste à débarrasser les effluents de tout élément susceptible de gêner le fonctionnement des ouvrages (**Grosclaude, 1999**). Ils permettent d'éliminer les matières les plus grossières, susceptibles d'endommager les organes mécaniques ou de perturber l'efficacité des étapes ultérieures. Ils font appel :

- à des procédés mécaniques, comme des grilles ou des tamis, pour éliminer des grosses particules transportées par les eaux. Les gros déchets sont tout d'abord éliminés par un dégrilleur constitué de barreaux espacés de 10 à 50 mm suivi d'un dégrilleur plus fin (3 à 10 mm) ou d'un tamisage (0,1 à 3mm) (**Grosclaude, 1999**).

- à des procédés physiques, comme des phénomènes de décantation pour éliminer les sables, ou de flottation pour éliminer les graisses (matières grasses) (**Rejsek, 2002**).

Le prétraitement se poursuit par l'élimination des particules denses ou abrasives. Ils regroupent les opérations suivantes :

Dégrillage:

L'opération de dégrillage permet de protéger la station contre l'arrivée des gros objets susceptibles de provoquer des bouchages au niveau de différentes unités de l'installation et d'éliminer les matières volumineuses charriées par l'eau brute, qui pourraient nuire à l'efficacité des traitements ultérieurs.

En fonction de l'espacement des barreaux on peut distinguer :

- Le dégrillage fin : écartement de 3 à 10 mm.
- Le dégrillage moyen : écartement de 10 à 45 mm.
- Le dégrillage grossier : écartement de 50 à 100 mm. (**Rejsek, 2002**).



Figure10: le Dégrillage (Anonyme, 2006).

✚ Le dessablage :

Dans cette étape, les sables présents dans l'effluent sont attirés vers le fond par l'effet de la force centrifuge dans un bassin circulaire, pour éviter leur sédimentation ultérieure, qui amène le bouchage de canalisations qu'il sera difficile de désobstruer, surtout si elles sont enterrées, ainsi que de protéger les organes mécaniques en mouvement rapide. Le dessablage concerne les particules minérales de diamètre supérieur à 0.2 mm environ. L'écoulement de l'eau, à une vitesse réduite dans un bassin appelé « dessableur » entraîne leur dépôt au fond de l'ouvrage. Les sables récupérés par aspersion sont ensuite essorés, puis sont envoyés soit en décharges soit réutilisés selon la qualité de lavage.(Rejsek, 2002).



Figure11: Le dessablage (Anonyme, 2006).

✚ Dégraissage, déshuilage :

C'est une opération destinée à éliminer les graisses, huiles et substances plus légères que l'eau, présentes dans les eaux résiduaires (stations-service, abattoirs, industries alimentaires,...) à condition que la température de l'eau soit suffisamment basse, pour permettre le figeage des graisses (**Mimeche, 2014**).



Figure12: Le déshuilage par écumage des graisses (**Anonyme, 2006**).

1.2 Traitement primaire (décantation primaire):

Il s'agit le plus souvent d'une décantation qui permet d'éliminer les matières en suspension décantables en deux heures. L'utilisation de réactifs chimiques pour éliminer des particules plus fines constitue un traitement physico-chimique. Ce traitement permet donc essentiellement l'élimination de la pollution particulaire et d'une partie de la pollution organique sous forme particulaire (de l'ordre de 65 à 80% de la DCO avec un traitement physico-chimique) (**Rejsek, 2002**).

Les matières en suspension ont souvent une teneur en matière organique importante (de 70 à 90%) et une densité légèrement supérieure à celle de l'eau. Elles vont se décarter naturellement dans un décanteur primaire en 1 à 2 heures. L'eau ainsi clarifiée s'écoulera par débordement et les MES qui ont décanté au fond du bassin (boues primaires) seront extraites et envoyées vers les ouvrages de traitement des boues (**Grosclaude, 1999**).

L'élimination de MES peut également être réalisée par flottation naturelle (particule naturellement plus légère que l'eau) ou provoquée (l'injection de microbilles d'air qui se fixent sur les particules réduit leur densité apparente). Ce procédé appelé flottation est principalement utilisé dans le traitement des eaux résiduaires industrielles (élimination

Des MES sur les effluents hautement fermentescibles, ex : agroalimentaire), pour l'élimination des graisses au niveau du prétraitement, ou encore pour la concentration des boues biologiques. (**Grosclaude, 1999**).

1.3 Traitement secondaire ou traitement biologique:

Le traitement biologique des eaux usées est le procédé qui permet la dégradation des polluants grâce à l'action de micro-organismes (**Rejsek, 2002**). Ils vont permettre ainsi d'éliminer la pollution soluble biodégradable et une partie des MES (**Grosclaude, 1999**).

Ce processus existe spontanément dans les milieux naturels tels que les eaux superficielles suffisamment aérées. Une multitude d'organismes est associée à cette dégradation selon différents cycles de transformation. Parmi ces organismes, on trouve généralement des bactéries, des algues, des champignons et des protozoaires. Cette microflore, extrêmement riche, peut s'adapter à divers types de polluants qu'elle consomme sous forme de nourriture (substrats). Il est ainsi possible d'utiliser systématiquement cette microflore dans un processus contrôlé pour réaliser l'épuration des eaux résiduaires. L'épuration biologique peut s'effectuer par voie aérobie ou anaérobie. Dans les deux cas ce sont des microorganismes adaptés au procédé qui se multiplient en absorbant la pollution organique (bactéries hétérotrophes assimilant les matières organiques). Au cours de la croissance aérobie, l'énergie prélevée de la transformation du carbone organique, devient une énergie disponible pour la synthèse (**Ouali, 2001**).

1.3.1 Traitement biologique intensifs

Les techniques les plus développées au niveau des stations d'épuration urbaines sont des procédés biologiques intensifs. Le principe de ces procédés est de localiser sur des surfaces réduites et d'intensifier les phénomènes de transformation et de destruction des matières organiques que l'on peut observer dans le milieu naturel. Trois grands types de procédés sont utilisés (**Aanat, 2008**).

- les lits bactériens.
- les disques biologiques.
- les boues activées.

✚ **Lits bactériens** : Le principe de fonctionnement d'un lit bactérien consiste à faire ruisseler les eaux usées, préalablement décantées sur une masse de matériaux poreux ou caverneux qui sert de support aux micro-organismes (bactéries) épurateurs qui forment un feutrage ou un film plus moins épais, sous lequel une couche anaérobie peut se développer la couche aérobie, si son épaisseur est importante (Figure 13). Les eaux à traiter ruissellent à la surface de la pellicule biologique qui prolifère sur le support, celles-ci renferment une forte concentration de bactéries et de champignons (Salghi, 2010). Ces organismes absorbent et métabolisent la matière organique de l'effluent, s'appauvrissent progressivement au cours de son trajet (Salghi, 2010).

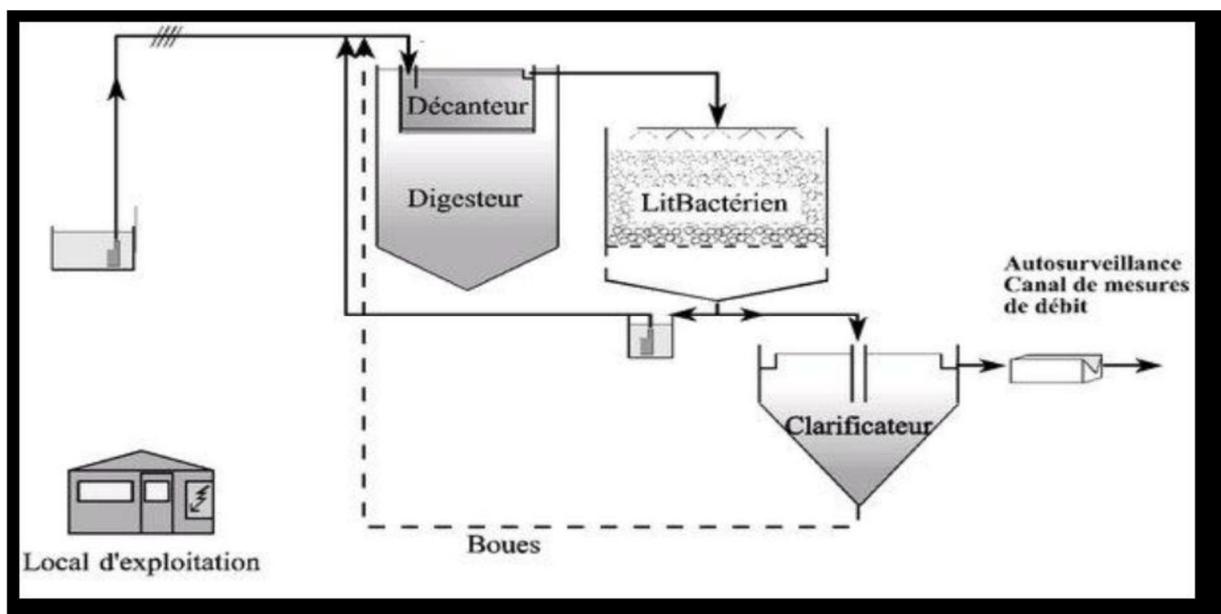


Figure13: Filière d'épuration des eaux usées par un lit bactérien (Salghi, 2010).

✚ **Disques biologiques** : Dans le procédé à biorisque, le support est constitué par des disques parallèles régulièrement espacés sur un axe horizontal, tournant à faible vitesse et immergés sur la moitié de leur hauteur. Ce mouvement induit une oxygénation de la culture pendant la période d'immersion. La température qui doit être comprise entre 15 et 29°C.

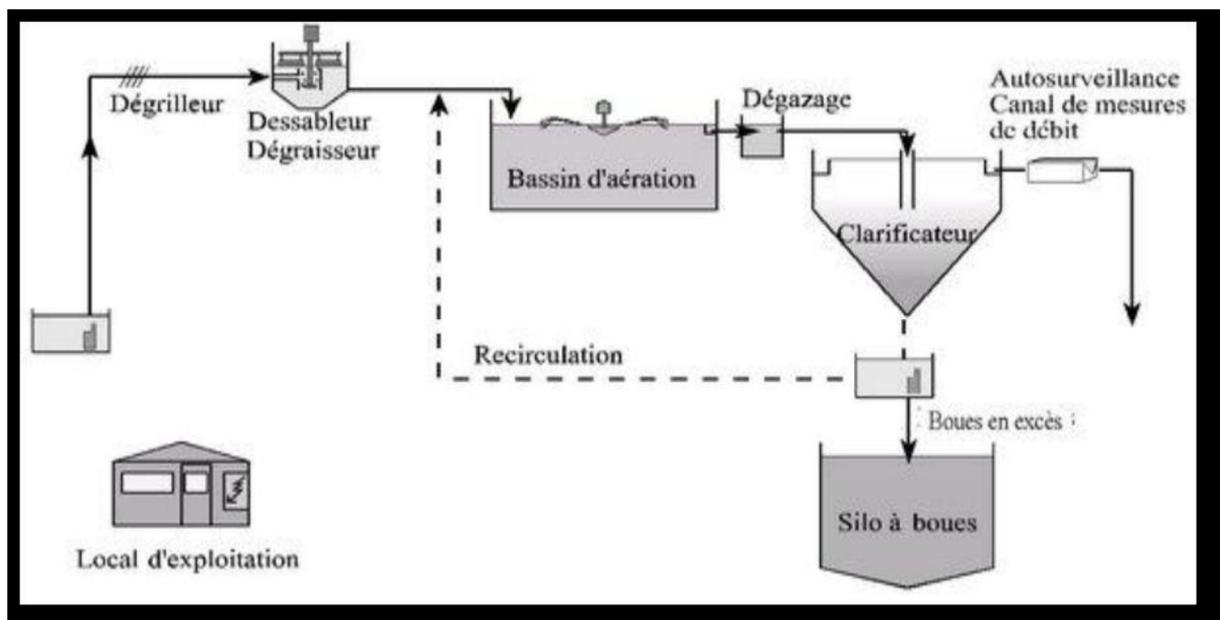
Les performances de ce procédé sont liées à :

- La profondeur d'immersion des disques (généralement deux mètres).
- La vitesse de rotation de l'arbre qui doit être optimale pour permettre une aération et une fixation des bactéries convenable.

Les micro-organismes se développent et forment un film biologique épurateur à la surface des

disques. Les disques étant semi immergés, leur rotation permet l'oxygénation de la biomasse fixée (Gommella et Guerree, 1983).

- ✚ **Boues activées** : C'est le procédé le plus répandu actuellement pour l'épuration des eaux résiduaires urbaines des petites, moyennes ou grandes collectivités. Le procédé à boues activées est un système en continu dans lequel des micro-organismes sont mis en contact avec des eaux usées renfermant des matières biodégradables pendant un temps suffisant. Ces amas biologiques sont maintenus en agitation au sein de l'eau de façon à assurer un contact avec toute la partie de l'effluent. L'oxygénation est fournie



en quantités suffisantes par des aérateurs (Gomella et Guerree, 1982).

Figure14: Filière d'épuration des eaux usées par boues activées (Salghi, 2010).

Ainsi, dans le bassin d'aération, en présence d'oxygène, les micro-organismes vont se développer et se reproduire aux dépens des matières biodégradables formant ainsi des flocons décantables, orientés par la suite vers un clarificateur (Figure 14). A la sortie une eau traitée et des boues seront produites, une partie de ces boues sera expédiée vers les organes de traitement de boues et l'autre partie réintroduite dans l'aérateur (Urios, 2005).

1.3.2 Traitement biologique extensifs:

Le lagunage : Un traitement par lagunage comprend en général trois types de bassins: un bassin anaérobie, un bassin facultatif et un bassin de maturation. Le bassin anaérobie permet de diminuer la charge en matière organique. L'anaérobiose est obtenue en apportant un effluent très chargé en matière organique. Dans ces lagunes, une profondeur importante est en principe un élément favorable au processus (5 à 6 m, par exemple). Ce bassin n'est applicable que sur des effluents à forte concentration et, le plus souvent, à titre de prétraitement avant un deuxième stade d'épuration de type aérobie surtout dans les pays à climat chaud où le terrain est disponible à coût raisonnable. Le lagunage utilise des mécanismes naturels pour traiter les eaux usées. Il est fort développé dans les petites communes rurales, en raison de son rusticité et de son performance d'épuration honorable. Par contre, ces procédés conviennent moins bien aux communes plus grandes, vu les grandes surfaces de bassins nécessaires.

Le bassin facultatif permet le développement d'algues photosynthétiques qui vont produire de l'oxygène nécessaire au développement des bactéries aérobies. Cet apport peut être complété exceptionnellement par des aérateurs pour stimuler l'activité biologique et diminuer les surfaces. Il existe deux types de bassins facultatifs, selon les végétaux qu'ils comprennent :

- Les bassins à microphytes : ils contiennent des algues microscopiques (essentiellement les algues vertes ou bleues),
- Les bassins à macrophytes : ils contiennent des végétaux macroscopiques, sous formes libres (ex. lentilles d'eau) ou fixées (ex. roseaux).(Mimeche, 2014)

 **La filtration /percolation** : La filtration ou percolation consiste à y traiter les eaux usées par l'intermédiaires d'un sol ou d'un massif filtrant (Vymasal, 2007). On filtre les effluents à raison de quelques centaines de litres d'effluents par mètres carrés de massif filtrants et par jours. Deux mécanismes entrent en jeu :

- Filtration de MES : plus le sable est grossier, plus la fixation de MES se fera en profondeur et les MES finissent par colmater le filtre. Pour lutter contre le bouchage du massif filtrant, il faut alterner phase de filtration et phase de séchage, l'élimination de MES permet l'élimination des microorganismes qui y sont fixés.
- L'adsorption des bactéries libres par les grains du sable de filtre il se forme alors un film biologique contaminé, surtout dans la partie supérieure ce film va permettre une dégradation microbienne de la matière organique et des substances dissoutes dans l'effluent

(phosphate, nitrates, etc). Cette dégradation consomme de l'O₂ et produit du CO₂, il faut donc aérer régulièrement le film pour éviter l'asphyxie du milieu.

Les techniques de filtrations/percolation permettent l'élimination des « gros » microorganismes (protozoaires et helminthes) par filtration/adsorption au début du massif filtrant. L'élimination des virus et des bactéries est fonction du milieu poreux (Vymasal, 2007).

La phytoépuration ou filtres plantés de macrophytes:

L'usage des végétaux aquatiques dans le traitement des eaux usées (phytoépuration) provient de l'observation des rôles de zones humides dans la préservation de la qualité des milieux aquatiques d'où le nom de marais filtrant artificiel. Son utilisation pour le traitement des eaux usées remonte à une centaine d'années. Les marais filtrants artificiels utilisés pour le traitement des eaux usées domestiques sont aussi appelés filtres plantés de macrophytes, ils sont constitués d'un lit de sol ou d'un autre milieu, tel que du gravier ou du sable, implanté avec des macrophytes et qui est inondé ou maintenu en condition saturée (niveau d'eau près de la surface) (Cors, 2007).

L'environnement étant ainsi propice à l'établissement de plantes adaptées aux conditions de sol saturé et produisant un important réseau de racines dans le milieu. Le traitement des eaux usées s'effectue au moyen d'une combinaison de processus physiques, chimiques et biologiques, incluant la sédimentation, la précipitation, l'adsorption sur les particules de sol, l'assimilation par les plantes et les transformations microbiologiques (Cors, 2007).

1.4 Traitement tertiaire:

En général, les techniques d'épuration, même les plus sévères, laissent passer dans l'eau épurée des matières organiques difficilement biodégradables et échappent à la meilleure décantation. Ainsi même après un traitement secondaire l'eau véhicule presque toujours des micro-organismes et des micropolluants. Si une éventuelle réutilisation de cette eau est envisagée, il convient par conséquent d'utiliser des procédés d'élimination de cette pollution résiduelle. On parlera donc de corrections chimiques ce qui permettra de donner à l'eau une qualité meilleure pour sa réutilisation. La principale méthode utilisée est la désinfection par le chlore, qui doit être appliquée avec des doses très fortes et des temps de contact longs. Mais

il convient de signaler suite à cette opération, des toxiques pour la vie aquatique peuvent être formés, il faut donc procéder à une opération de déchloration avant le rejet.

A côté de la désinfection par le chlore, d'autres procédés existent également mais qui restent pratiquement inutilisables dans les domaines de l'épuration des eaux usées. Ceci s'explique par leurs coûts qui restent excessivement élevés, mais qui peuvent conduire une eau de qualité. On peut citer par exemple l'échange ionique et l'adsorption sur du charbon actif. (Gomella et Guerree, 1983).

2- Traitement des eaux usées par macrophytes (phytoépuration):

La purification artificielle des eaux usées au niveau des stations d'épuration, à travers les pays utilisateurs de ce mode, a montré sa complexité et ses exigences matérielles et humaine (haute technicité) ; de ce fait d'autres moyens plus simples et efficaces ont été mis en place pour l'épuration des eaux. Parmi eux un mode purement naturelle où les agents actifs dans le processus sont des Macrophytes (plantes supérieures), pour cette technique l'intervention de l'homme est très limitée et l'installation n'est pas trop coûteuse (Saggai, 2004).

2.1 Définition de la phytoépuration:

La phytoépuration est un système de traitement des eaux usées en utilisant le pouvoir épurateur des plantes. Ces dernières sont des microphytes et/ou des macrophytes. Elle peut être réalisée à travers différents systèmes, caractérisés par le fait que l'eau vient couler lentement et sous conditions contrôlées à l'intérieur de milieux végétales, de façon à en favoriser la dépuración naturel, qui s'effectue à cause du processus d'aération, sédimentation, absorption et métabolisation de la part des microorganismes et de la flore.

Les macrophytes et plus spécifiquement les roseaux (*Phragmites australis*) ont la particularité de former un tissu racinaire et un réseau de galeries qui drainent apportent de l'oxygène et servent de support aux bactéries aérobies. Ces bactéries, ainsi que la macrofaune du sol, ont un rôle de dégradation et de minéralisation de la matière organique, qui devient dès lors assimilable par les plantes. Ainsi le système ne produit pas de boues, lesquelles sont compostées et forment un humus sur place (Medjdoub, 2014).

Historique de la Phytoépuration :

Plusieurs techniques coûteuses peuvent être utilisées dans l'épuration des eaux non conventionnelles; le besoin de techniques simple, économiquement compétitives et pouvant préserver les caractéristiques des écosystèmes, comme l'application de la phytoépuration dans le traitement des eaux usées.

La phytoépuration est une opération qui consiste à purifier l'eau c'est-à-dire à la débarrasser des éléments polluants et qui repose sur des processus naturels, d'origine biotique et/ou abiotique, mis en oeuvre par les plantes, les microorganismes de la rhizosphère et le substrat dans lequel ils évoluent, une grande variété de plantes aquatiques de type flottantes, émergentes ou submergées, rassemblées ici sous le terme générique de « macrophytes », peut être utilisée pour la phytoépuration, à la fois pour leurs rôles directs et indirects (**Guittonny, 2014**).

2.2 Principe de la phytoépuration:

Cette filière d'épuration s'appuie sur le pouvoir épurateur des végétaux aquatiques : algues, hydrophytes (plantes d'eau libre) et hélophytes (plantes du bord des eaux). Les eaux usées séjournent simplement dans une série de bassin à ciel ouvert peuplés de ces végétaux.

(**Liénard et al., 2000**).

les eaux brutes (eaux grises et eaux vannes) passent à travers des bassins remplis d'un substrat minéral (sable, graviers, pouzzolane selon les cas) ou sont plantés différents végétaux subaquatiques (macrophytes) : roseaux, massettes, joncs, iris (espèces locales de préférence car elles sont adaptées au climat. Ces dernière consomment les composés polluants dissous dans l'eau – azote et phosphore, qui constituent pour eux des éléments nutritifs. Par ailleurs elles servent de supports à de nombreux organismes microscopiques-algues et bactéries qui font le gros du travail. Quant aux hydrophytes, elles absorbent les nutriments en excès à travers les parois cellulaires de leurs tiges et feuilles très ramifiées et produisent de l'oxygène nécessaire à la décomposition des matières organiques et à l'oxydation de l'azote ammoniacal préjudiciable au milieu aquatique. Leur rôle se cantonne plutôt au bassin de finition, souvent négligé (**Guilloteau et al., 1993**).

3 – Les paramètres influençant la phytoépuration

L'aération du substrat :

Qui se présente comme le plus important de ces paramètres car c'est un paramètre limitant. En effet, l'élimination des matières organiques et la nitrification sont deux réactions qui demandent beaucoup d'oxygène. (**Mekhloufi , 2003**).

Température :

Elle a une influence déterminante sur l'activité biologique des micro-organismes et sur la réserve d'oxygène pour le processus d'auto-épuration. Pour l'ensemble des micro-

organismes responsables des biodégradations, la zone de température favorable se situe entre 4 et 25 °c en aérobie, et entre 10 et 65 °c en anaérobie.

La présence d'oxygène dissous dans l'eau est indispensable; l'oxygène permet de maintenir plusieurs facteurs de la qualité de l'eau, notamment son goût, il est essentiel pour la survie de nombreux organismes aquatiques.

L'oxygène dissous dans l'eau peut provenir :

- De la dissolution de l'oxygène de l'air par la diffusion à travers la surface;
- De l'apport d'un affluent plus oxygéné, surtout dans le cas des rivières, et parfois même, d'une aération artificielle;
- De la biosynthèse pour les plantes vertes aquatiques qui, sous l'effet de la lumière solaire, utilisent le CO₂ dissous dans l'eau grâce à leur fonction chlorophyllienne dans le cas du lagunage (Mekhloufi , 2003).

Pollution microbiologique:

Le rejet urbain en général présente des conditions très favorables à la prolifération de certains germes pathogènes et d'organismes vivants. On peut citer les virus, les bactéries, les protozoaires, les vers et les microchampignons. Ces différents éléments garantissent une masse permanente en germes utiles à l'épuration par biodégradation.

Les micro-organismes ont un rôle essentiel à jouer dans tous les systèmes de traitement des eaux usées à partir des plantes. Qu'ils soient aérobies ou anaérobies, ce sont eux qui consomment la partie carbonée des eaux usées pour la transformer principalement en CO₂ pour les bactéries aérobies et aussi en méthane pour les bactéries anaérobies. Lorsqu'il est possible de maintenir des conditions séquentielles aérobies et anaérobies, les bactéries nitrifiantes vont transformer l'azote ammoniacal en nitrites et nitrates dans les zones aérées et les bactéries dénitrifiantes vont permettre la transformation des nitrates et nitrites en azote gazeux dans les zones anaérobies (Medjdoub, 2014).

Constitution du filtre :

La qualité des matériaux est la condition majeure au bon fonctionnement des filtres (durée de vie et performances épuratoires). De par sa granulométrie, le matériau de remplissage a un rôle évident de filtration des matières en suspension et de la partie organique associées présentes dans les eaux usées, d'où le nom de filtres, Son efficacité dans ce rôle dépend en grande partie de la texture du matériau que l'on approche par sa granulométrie et qui interviendra notamment sur les caractéristiques hydrodynamiques (conductivité hydraulique en milieu

saturé ou non).

Les graviers et les sables utilisés doivent être roulés, lavés et à fin d'éviter d'éventuelles contamination de la nappe souterraine, les bassins de phytoépuration doivent être imperméabilisés, en utilisant des géomembranes synthétiques ou de la bentonite, cependant, il est déconseillé de couler un radier en ciment pour une question de coût de réalisation et de problèmes d'étanchéité.

L'utilisation d'un sol argileux est la possibilité la plus économique, qui nécessite cependant une très faible perméabilité ($K < 10^{-8}$ m/s) et avec une profondeur de nappe à plus de 1 m sous la base du lit du bassin (Carleton *et al.*, 2001).

Effets des plantes dans le système de phytoépuration:

Les macrophytes participent d'une façon indirecte à la décomposition des substances organiques des eaux usées brutes. Ces plantes disposent d'un système racinaire très dense qui améliore l'oxygénation des filtres, et par la suite le développement des micro-organismes adéquats. Poursuivant leur croissance même en hiver, les rhizomes assurent enfin le fonctionnement permanent de la station d'épuration (Bhupinder *et al.*, 2009).

Le développement racinaire limite le colmatage des filtres grâce à la formation de pores tubulaires le long des racines qui permet d'accroître la surface de fixation pour le développement des micro-organismes (Bhupinder *et al.*, 2009).

Temps de séjour:

Les eaux à traiter doivent séjourner dans les bassins pendant une durée supérieure ou égale au temps nécessaire à leur épuration, Aussi l'efficacité d'un traitement par lagunage dépend fortement du temps de séjour qui est plus long en hiver qu'en été (Astebol *et al.*, 2004).

Le temps de séjour de l'eau dans un marais est en fonction de la pente de celui-ci. Selon certains auteurs, la pente longitudinale d'un marais filtrant peut varier entre 0 à 1 %. (Johnson, 2002). Cependant, plus la pente est élevée, plus court sera le temps de séjour de l'affluent et moindre sera l'efficacité du traitement.

Le temps de séjour minimum recommandé est de 24 heures (Astebol *et al.*, 2004).

4- types des filtres plantés:

Cette filière d'épuration s'appuie sur le pouvoir épurateur des végétaux aquatiques : algues, hydrophytes (plantes d'eau libre) et héliophytes (plantes du bord des eaux). Les eaux

usées séjournent simplement dans une série de bassin à ciel ouvert peuplés de ces végétaux (Liénard *et al.*,2000).

les eaux brutes (eaux grises et eaux vannes) passent à travers des bassins remplis d'un substrat minéral (sable, graviers, pouzzolane selon les cas) ou sont plantés différents végétaux subaquatiques (macrophytes) : roseaux, massettes, joncs, iris (espèces locales de préférence car elles sont adaptées au climat. Ces dernière consomment les composés polluants dissous ,dans l'eau – azote et phosphore, qui constituent pour eux des éléments nutritifs. Par ailleurs elles servent de supports à de nombreux organismes microscopiques-algues et bactéries qui font le gros du travail. Quant aux hydrophytes, elles absorbent les nutriments en excès à travers les parois cellulaires de leurs tiges et feuilles très ramifiées et produisent de l'oxygène nécessaire à la décomposition des matières organiques et à l'oxydation de l'azote ammoniacal préjudiciable au milieu aquatique. Leur rôle se cantonne plutôt au bassin de finition, souvent négligé. (Guilloteau *et al.*,1993).

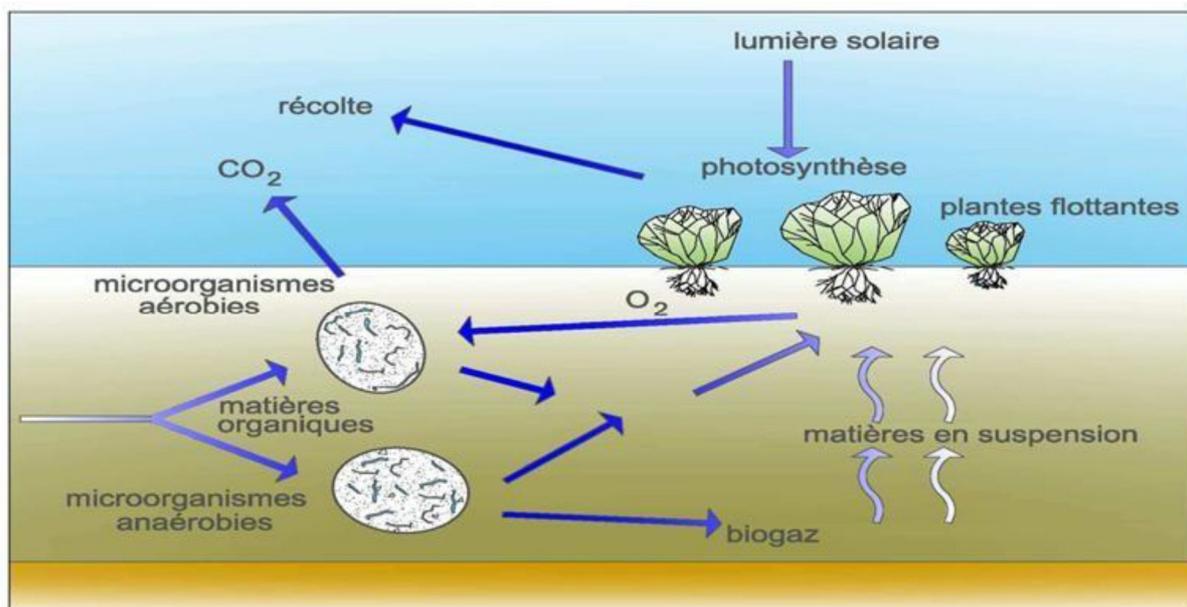


Figure15 : Principes de l'épuration dans un bassin à macrophytes flottants

(Rakotoarison, 2008).

4.1. Filtres plantés à écoulement vertical principe de fonctionnement et performance:

Les filtres verticaux sont des bassins remplis de couches de graviers de granulométries différentes superposées, et selon leur place dans la filière de traitements recouverts ou non d'une couche de sable, dans laquelle sont plantés les macrophytes. Suite à des travaux conduits, notamment en France par le Cemagref, en parallèle sur les lits d'infiltration percolation sur sable et les filtres plantés de roseaux (figure 16) (Agence de l'eau, 2007)

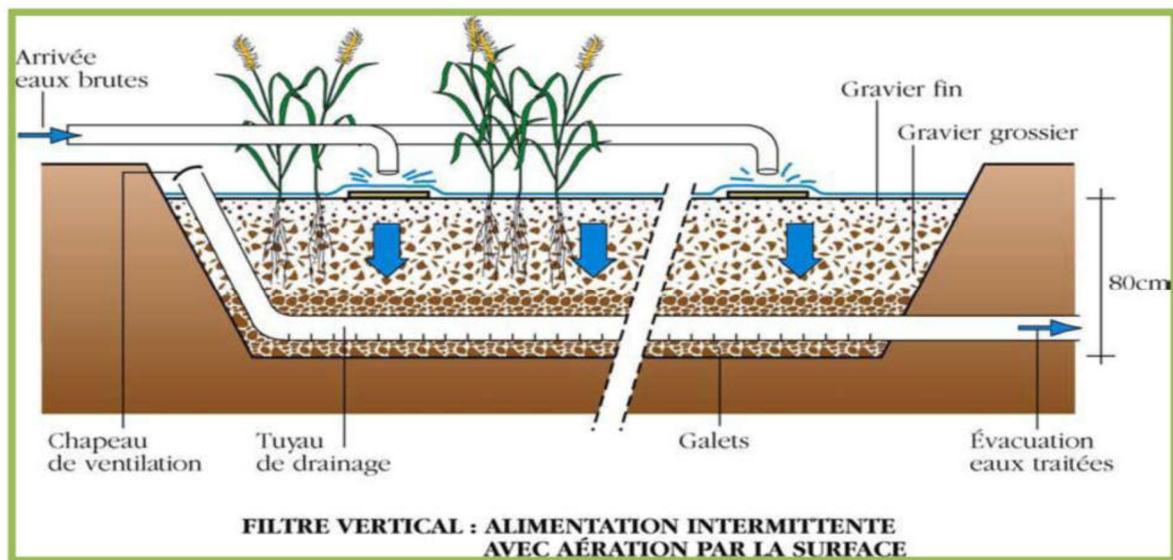


Figure16: Schéma d'un filtre vertical (deuxième étage) en coupe transversale (Boutin et al, 2004).

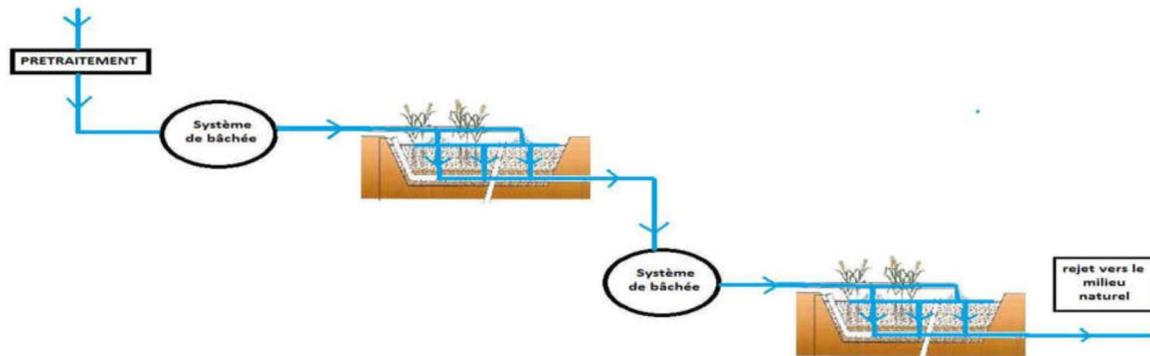


Figure 17 : Principe de fonctionnement du filtre vertical (Boutin *et al*, 2004).

Les filtres sont des excavations, étanchées du sol, remplies de couches successives de gravier ou de sable de granulométrie variable selon la qualité des eaux usées à traiter. Contrairement à l'infiltration-percolation précédemment évoquée, l'influent brut est réparti directement, sans décantation préalable, à la surface du filtre. Il s'écoule en son sein en subissant un traitement physique (filtration), chimique (adsorption, complexations...) et biologique (biomasse fixée sur support fin). Les eaux épurées sont drainées. Les filtres sont alimentés en eaux usées brutes par bâchées. Pour un même étage, la surface de filtration est séparée en plusieurs unités permettant d'instaurer des périodes d'alimentation et de repos. (Agence de l'eau, 2007).

4.2 Les filtres à écoulement horizontal, principe de fonctionnement et performance:

Les filtres horizontaux sont des bassins remplis de manière homogène de sable, de gravier ou de sol en place, et dans lesquels ont été plantés des macrophytes. L'effluent est réparti sur toute la largeur et la hauteur du filtre par un système répartiteur situé à une extrémité du bassin ; il s'écoule ensuite dans un sens principalement horizontal au travers du substrat. La plupart du temps, l'alimentation a lieu en continu et les matériaux sont pratiquement saturés en permanence. Le niveau d'eau doit être maintenu à environ 5 cm sous la surface du matériau (figure 18). Ceci permet d'éviter les écoulements préférentiels en surface et d'assurer un flux homogène. (L'OMS, 1989).

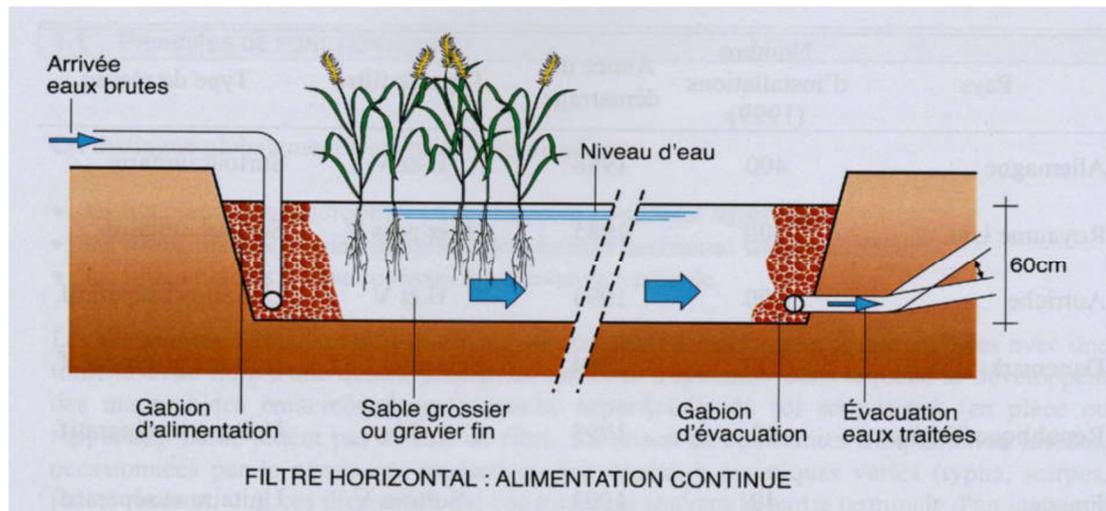


Figure18: Schéma d'un filtre horizontal en coupe transversale (Boutin *et al.*, 2004).

Les filtres horizontaux nécessitent un prétraitement des eaux, par exemple par un filtre vertical, des fosses septiques ou un petit bassin de lagunage pour ne pas risquer de se colmater. Ils conviennent davantage pour les eaux usées assez eu chargées. Ces filtres sont généralement intégrés dans un ensemble de dispositifs d'épuration pouvant être utilisés pour l'épuration des eaux domestiques à l'échelle d'une famille ou d'une communauté et pouvant remplacer les puisards ou les fosses septiques . (L'OMS, 1989).

4.3 Les systèmes mixtes:

Les systèmes mixtes sont en fait l'association en série de filtres verticaux et de filtres horizontaux. Généralement cette association est constituée de deux étages consécutifs de filtres verticaux en parallèle suivis de deux ou trois étages de filtres horizontaux en série. L'intérêt d'une telle association est d'obtenir une bonne nitrification dans les filtres verticaux qui sont bien oxygénés, mais aussi une dénitrification dans les filtres horizontaux où l'on trouve les conditions d'anoxie nécessaires à cette réaction. Les rendements de la dénitrification ne sont pas très élevés car les bactéries dénitrifiâtes ont besoin de matières organique pour se développer et dénitrifier correctement. Or, en sortie des filtres verticaux, la majeure partie de la matière organique a été dégradée, elle n'est donc plus disponible pour les bactéries (Genèveet et Zoulikha, 2017).

Dans ce type de système (mixte) l'élimination des matières organique (DBO5 et DCO) et des matières en suspension est très élevée et stable au cours des années d'exploitation. Cependant l'enlèvement d'éléments nutritifs (azote et phosphore) est généralement faible et ne dépasse pas 50% des eaux usées. Le système mixte appelé aussi Hydride construit des zones humides

combinées (phénomène de nitrification et dénitrification) afin d'obtenir un effet de traitement plus élevé en particulier pour l'azote (Molle, 2003).

5- Avantage et inconvénient de la phytoépuration:

5.1 Avantage de la phytoépuration:

Elle ne dégrade pas l'environnement principalement dut au fait qu'elle ne dégage pas de gaz à effet de serre. Ainsi elle est constituée de matériaux naturels

➤ L'exploitation de la station d'épuration est simple et peu contraignante que se soit au niveau du temps qu'au niveau de sa complexité, elle demande donc peu de compétences (Pauline, 1995)

- Moins coûteux à construire et à exploiter que les systèmes conventionnels
- Facilité de mise en œuvre
- Nécessite peu d'équipements mécanisés
- Consomme peu d'énergie
- Contrairement au lagunage, cette installation peut intégrer le tissu urbain (Cors, 2007).

➤ L'eau traitée par cette station d'épuration est de bonne qualité par rapport à d'autres infrastructures (Yvan *et al.*, 2002).

- Elle possède une excellente élimination de la pollution microbologique.
- Contribue au développement et à la diversification de la flore locale, ainsi qu'à la protection de la faune et de la biodiversité. (Yvan *et al.*, 2002).

➤ Le traitement est 100% naturel, sans produit chimique.

➤ la tolérance aux variations de charges et de débits est très importante (Yvan *et al.*, 2002).

5.2 Inconvénients de la phytoépuration:

➤ Elle ne s'adapte qu'aux petites collectivités de moins de 2000 équivalent-habitants, plus il y a d'habitants plus il y a besoin d'une grande surface, en effet il faut entre 2 et 4.5 m² par habitants.

➤ Il faut également assurer une pente naturelle suffisante, entre l'entrée et la sortie de la station pour que l'eau puisse couler.

➤ Variation saisonnière de la qualité de l'eau en sortie.

➤ En cas de mauvais fonctionnement, risque d'odeurs pourrait apparaître. (Anne, 2001).

6- Conception d'une station par la phytoépuration:

Le lagunage est utilisé pour le traitement des effluents domestiques d'une région qui ne dépasse pas 2000 habitants. Une étude préalable du sol est recommandée avant d'installer les bassins épurateurs pour éviter toute contamination avec le milieu. Cette étude concerne la perméabilité du sol, la présence d'une nappe phréatique, s'il y a un risque d'infiltration, il

vaut mieux étanchéifier le fond du bassin en mettant un film plastique ou en apportant de l'argile. Pour diminuer les dépenses liées au traitement des eaux (nécessité de pompage électrique par exemple), il faut que le sens d'écoulement de l'eau suive la pente naturelle du terrain. Les données de base sont les suivantes : **(Rakotoarisoa, 2011)**

6.1 Dimensionnement du bassin:

Le calcul du dimensionnement des bassins dans un lagunage à macrophytes se fait en suivant le nombre d'habitants qui se traduit en l'équivalent-habitant (EH) c'est-à-dire une unité conventionnelle qui représente la moyenne de la charge polluante engendrée par habitant et par jour, dans un volume moyen de 150 litre d'eau.

L'épuration par lagunage aéré seul a besoin d'une surface de 10m²/ EH tandis que la surface des bassins à filtres plantés est en dessous de la moitié de celle-ci. C'est pour cette raison que le lagunage à microphytes seul n'est pas praticable en milieu urbain. Il est plutôt destiné en milieu rural. **(Rakotoarisoa, 2011).**

6.2 Contrôle de la station d'épuration:

Le contrôle des rejets des stations d'épuration s'inscrit dans le cadre général de l'auto surveillance réalisée par l'exploitant. Cette surveillance s'effectue sous le contrôle des services administratifs **(Rajaonarivelo,2013)**.

7- Phytoépuration en Algérie:

En Algérie, cette technique d'épuration, par filtres plantés, a fait son apparition que tardivement. En effet, ce n'est qu'en 2007 que le ministère des ressources en eau a procédé à la mise en place d'un système expérimental d'épuration des eaux usées basé sur un procédé naturel.

Ce pilote expérimental, destiné pour les petites agglomérations de moins de 2000 habitants est le premier du genre en Algérie, réalisé dans la région de Témacine servira de test pour une éventuelle vulgarisation à travers les zones et les hameaux enclavés de notre pays et qui sont dépourvus de système d'épuration.

Les premiers résultats obtenus à travers ce pilote sont concluantes vis à vis des objectifs traces relatifs aux rendements épuratoires des éléments responsables de la pollution. Ce travail constituera avant tout une contribution à la compréhension du système et mécanismes d'épuration par lits plantés particulièrement en zones arides (**Madjoub,2014**).

Bensalimane et al (2013), ont établi une étude sur les performances épuratoires des eaux usées au profit des petites collectivités par le biais d'un système utilisant des lits plantés en végétaux pour le suivi de l'abattement des principaux paramètres physico-chimiques (température, pH, conductivité électrique, matière en suspension, oxygène dissous, turbidité, DBO5, DCO et certains métaux lourds) de la pollution des eaux usées. Les travaux de cette expérimentation se déroulent dans la commune de Mascara (Algérie).

Le protocole expérimental est constitué d'une série de bassins imperméables, remplis de graviers, servant de support à des végétaux saprophytes. Les eaux usées transitent au travers du massif filtrant selon une circulation gravitaire, selon les différents types d'écoulement envisagés (vertical, horizontal et mixte). Ainsi, les filières épuratoires mettent mises en jeu se composent de quatre combinaisons ou variantes d'écoulement des eaux usées.(V1H1, V2H1, V1H2, V2H2).

Les résultats ont montré que L'abattement du chrome hexa valent au niveau de la station de lagunage est de l'ordre de 36 %, tandis qu'à la sortie du pilote expérimental, il est de 76,32 % dans la variante V1H2. ainsi que l'abattement des teneurs en fer de la station de lagunage est de 28,89 %, alors que pour le pilote il est de 64,95 % ; ce qui déduit les bonnes performances de la phyto épuration particulièrement pour la variante V1H2.

De même l'abattement moyen au niveau de la station de lagunage est de 23,77 % lorsqu'il atteint les 75,18 % pour le pilote expérimental enregistré au niveau de la variante V1H2

D'autres travaux, ont été également réalisées par Bengouga *et al*, 2010 dans une région aride d'Algérie (Biskra) durant le mois avril ou Deux espèces végétales sont testées expérimentalement afin d'épurer les eaux usées de cette région. Dans une station pionnière Sept bassines identiques menu d'un robinet chacune et remplis e 4 couches de gravier superposées verticalement en parallèle de la transplantation du matériel végétal constitué de deux espèces : *Phragmites communis* et *Cyperus papyrus*, D'après les résultats obtenus le *Phragmites communis* montre des avantages en matière de prélèvement de : la DBO5, DCO,

O₂, MO et PO₃-4. Tandis que le *Cyperus papyrus* montre des avantages en matière de prélèvement de la DCO et la MO seulement.

Conclusion

Conclusion

L'épuration des eaux usées par les filtres plantés de macrophytes apparaît comme une technique incontournable pour le développement durable des stratégies d'assainissement. Face aux avantages de la solution (fiabilité, faible coût d'entretien, gestion des boues simplifiées, odeurs contrôlées, résistance aux variations de charge et intégration paysagère). dans les années à venir ce pourcentage devrait continuer de croître fortement, d'autant que quasiment tous les acteurs du marché proposent dorénavant des filtres plantés de roseaux.

En Algérie l'épuration des eaux usées est limitée, on compte 67 stations dont 11 actuellement sont fonctionnelles [DHW. 2004] La purification artificielle des eaux usées a montré sa complexité et ses exigences matérielles et humaine (haute technicité). De ce fait le mode purement naturel où les agents actifs dans le processus sont des macrophytes est de plus en plus utilisé. Plus écologique, rentrant dans le cadre du développement durable cette technique a beaucoup d'avantages: l'intervention de l'homme est très limitée et l'installation n'est pas trop coûteuse.

Dans ce travail nous avons passé en revue les principales recherches, relatives à la technique d'épuration par la phytoépuration et en l'occurrence par les filtres plantés à macrophytes. Ce procédé permet d'obtenir une eau débarrassée d'une grande partie de ces polluants et des boues constituant un sous-produit de l'épuration. L'eau épurée peut enfin être rejetée dans le milieu naturel sans risque majeur.

Références bibliographiques

Bibliographie

A

Aanat, (2008) : «Plan d'Aménagement du Terrain de la Wilaya de Tlemcen PATW». Phase I.

Adriano D.C., 2001. Trace elements in terrestrial environments: Biochemistry, bioavailability and risks of metals. SpringerVerlag, New York.

Agence de l'eau, 2007, Procédés d'épuration des petites collectivités du bassin RhinMeuse; Éléments de comparaison techniques et économiques. Agence de l'eau : RhinMeuse.

ANONYME, 2006. Herbar MarieVictorin : Confection d'un herbar 23 p.
http://www.irbv.umontreal.ca/francais/herbar/confection/page_accueil.htm.

Astebol, S.O, HvitvedJabobsen T, Simonsen, O, 2004: Sustainable stormwater management at Fornebu from an air port to an industrial and residential area of the city of Oslo, Norway, Science of The Total Environment 33.

Audic JM , Esser D,2006: L'épuration: Nettoyée pour protéger l'écosystème aquatique, un récit de vingt-cinq ans de recherche partenariale pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement avec suez environnement et société d'ingénierie nature et technique, Ed Cemagref .

B

B. LOMBI, WENZEL W.W., ADRIANO D.C. Arseniccontaminated soils: I. risk assessment, chap 33. in Remediation engineering of contaminated soils, D.L. Wise, D.J. Trantolo, E.J. Cichon, H.I. Inyang and U. Stottmeister editors, Dekker, New York, 2000. P: 715738.

Baath E., 1992. Measurement of heavy metal tolerance of soil bacteria using thymidine incorporation into bacteria extracted after homogenization centrifugation. Soil Biology and Biochemistry, 24(11), 1167-1172.

Bachi, 2010 : mémoire présenté en vue de L'obtention du diplôme de magister thème diagnostic sur la valorisation de quelques plantes du jardin d'épuration de station du vieux ksar Témacin. Ouargla .

Baumont, S., Camard, J. P., Lefranc, A., Franconi, A. (2004). Réutilisation des eaux usées: risques sanitaires et faisabilité en Île de France. *Rapport ORS, 220p.*

Références bibliographiques

Beiere, 2001 : Ecogestion d'habitats Bureau d'Etudes Industrielles Energies Renouvelables et Environnement .

Ben Salem Z., 2014. Étude de la bioaccumulation des éléments traces métalliques chez les macrophytes et les poissons dans la décharge d'Étuefont (Belfort, France) : Intérêts de l'utilisation de l'approche moléculaire pour la détection de génotoxicité, Thèse de doctorat, Biodiversité et Écosystèmes Aquatiques, l'université de Sfax, page 24.

BenAmeur, N, 2010 : Analyse des microorganismes présents dans les lits à macrophytes lors de la phytoépuration des eaux usées. Mémoire de Magister en biologie. Université Med Khider – Biskra.

BENSAYAH N, LEKEHAL I, (2017) : « L'étude des systèmes de collecte et épuration des eaux usées du Groupement urbain de Tlemcen ». Projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de master en hydraulique, université Abou Bakr Belkaid Tlemcen

Boutin, C., Liénard, A., and Esser, D., 1997. Development of a new

C

C. BALTZER 1993: Les métaux lourds dans les boues d'épuration urbaines du BASRHIN. mémoire de fin d'étude. DESS" Sciences de l'Environnement " Université Louis Pasteur, Strasbourg.

Carleton, J.N., et al ,2001: Factors affecting the performance of storm water treatment wetlands, *Water Research* 35: 1552-1562.n°.29.

Cauchi, H., Nakache, S. D., Zagury, B., Carré, C., Denis, D., Larbaigt, D., Martigne, S. (1996). Dossier: la réutilisation des eaux usées après épuration. *TSM*, 2, 81-118.

Chifolleau J.F., Claisse D., Cossa D., Ficht A., Gonzalez G.L., 2001. La contamination métallique. Edt. Ifremer. 39p.

Chocat B, 1997 : Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement. Ed. Tec & Doc.

Cors Marie, (2007). Techniques extensives d'épuration des eaux usées domestiques. Le meilleur choix environnemental en zone rurale Dossier IEW InterEnvironnement Wallonie.

Cors Marie, 2007: Techniques extensives d'épuration des eaux usées domestiques. Le meilleur choix environnemental en zone rurale Dossier IEW InterEnvironnement Wallonie.

Références bibliographiques

D

DESJARDINS. R., (1997) : «Le traitement des eaux», 2ème édition, Ed. Ecole polytechnique de Montréal, Canada.

Devaux, I. (1999). Intérêts et limites de la mise en place d'un suivi sanitaire dans le cadre de la réutilisation agricole des eaux usées traitées de l'agglomération clermontoise (Doctoral dissertation, Université Joseph Fourier (Grenoble).

Djermakoye, H. (2005). Les eaux résiduaires des tanneries et des teintureries; Caractéristiques physicochimiques, bactériologiques et impact sur les eaux de surface et les eaux souterraines. *Mémoire de Thèse, Faculté de Médecine, Pharmacie et d'OdontoStomatologie, Université de Bamako*.

Dugniolle H, 1980: L'assainissement des eaux résiduaires domestiques, CSTC revue n° 3 septembre .

E

Ecosse, D. (2001). Techniques alternatives en vue de subvenir à la pénurie d'eau dans le monde. *Mémoire du DESS «Qualité et Gestion de l'Eau», Faculté des Sciences, Amiens*.

F

Fauteux A., 2002. Des roseaux contre les eaux usées. revue de la science de Québec nouvelle édition. 340p.

Fischesser B., DupuisTate M.F., 2007. Le guide illustré de l'écologie. Paris, Éditions De La Martinière, 349p.

Fleurbec., 1987. Plantes sauvages des lacs, rivières et tourbières. *Fleurbec éditeur, SaintAugustin (Portneuf), 399 p*.

G

Gagnon V., 2012. Effet de l'espèce de plante en marais filtrants artificiels selon la saison, le type de marais filtrant et la nature des polluants. Rapport de thèse de doctorat spécialité Génie des procédés. Université de Montréal, Canada.

Gagnon V., 2012. Effet de l'espèce de plante en marais filtrants artificiels selon la saison, le type de marais filtrant et la nature des polluants. Rapport de thèse de doctorat spécialité Génie des procédés. Université de Montréal, Canada.

GALVÃO, Patrícia Paixão Pagu (A autobiografia precoce de Patrícia Galvão [2005].

Références bibliographiques

Generation of ReedBed Filters in France : First results. *Wat.Sci.Tech.*, 35 (5), 315 322.

Genèveet SADIK Zoulikha Manel : (2017):Etude de faisabilité d'une STEP par filtre planté de roseauxdes eaux usées de l'agglomération secondaire de Béni Ghazli— Commune d'Oued LakhdarMémoire de fin d'étude en vue d'obtention du Diplôme de Master en Hydraulique.

Gérard, M. 2001. Les effets des métaux lourds sur l'environnement et la santé. Sénateur France.

Gomella. C, Guerre. H., (1982). Les eaux usées dans les agglomérations urbaines ou rurales. Tomes I : La collecte, Edition : Eyrolles. Paris. 512 pp.

Gomella. C, Guerre. H., (1983). Les eaux usées dans les agglomérations urbaines ou rurales. Tomes I : La collecte, Edition : Eyrolles. Paris. 512 pp.

Grosclaude .G, (1999). L'eau : usage et polluant, Tome II. 4eme Edition: INRA, Paris. 11pp.

Gueroui Y., 2014. Caractérisation Hydrochimique et Bactériologique des Eaux Souterraines de l'aquifère Superficiel de la Plaine de Tamlouka (NordEst Algérien). Thèse de doctorat. Option : Santé, Eau et Environnement. Université de Guelma.Algerie. P : 200.

Guilloteau J.A., Liénard A., Vachon A., and Lesavre, J., 1993. Wastewatertreatment by infiltration basins. Case study : Saint Symphorien de Lay, France. *Wat. Sci. Tech.*, 27 (9), pp 97104.

Guilloteau J.A., Liénard A., Vachon A., and Lesavre, J., 1993a. Wastewater treatment by infiltration basins. Case study : Saint Symphorien de Lay, France. *Wat. Sci. Tech.*, 27 (9), pp 97104.

GuittonnyPhilippe, A. (2014). Phytoépuration de mélanges de polluants organiques et métalliques pour la préservation des zones humides méditerranéennes, thèse doctorat, université d'AixMarseille, 346P.

H

Hannachi, A., Gharzouli, R., &Tabet, Y. D. (2014). Gestion et valorisation des eaux usées en Algérie. *LARHYSS Journal PISSN 11123680/EISSN 25219782*, (19).

Références bibliographiques

Haoua A., (2007) : «Modélisation de séchage solaire sous serre des boues de station d'épuration urbains». Thèse de doctorat, université Louis Pasteur Strasbourg IDiscipline: Sciences pour l'ingénieur.

Haury J., 1992. Les types écomorphologiques des macrophytes. Intérêt pour la description et la compréhension de la végétation des cours d'eau. 15ème conférence.

Holmes N.T.H., WhittonB.A., 1977. The macrophytic vegetation of the River Tees in 1975: observed and predicted changes. *Freshwater Biology*, 7(1).p.4360.

Hopkin S.P., 1989. Ecophysiology of metals in terrestrial invertebrates. Elsevier, Applied Science Publishers.

Huynh., 2009. Impact des métaux lourds sur l'interaction plantes/ verre de terre/ microfloretellutrique thèse de Doctorat .UnivParis Est p169.

K

Kabata Pendias A., Pendias H., 2001. Trace éléments in soils and plants, Third Edition CRC press, Boca Raton, USA. science, NY, USA. 366 p.

Kesbi R., (2016) : «Etude des performances épuratoires d'une STEP de l'Ouest Algérien cas de la nouvelle STEP d'Ain Témouchent». Projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de master en hydraulique, université Abou BakrBelkaid Tlemcen.

Khalila Bengouga, Halima Mancer, Mahmoud Debabeche, 2010, resultats preliminaires de la phytoepuration des eaux usees dans les regions arides d algerie (cas de BISKRA), Courrier du Savoir.

L

L'OMS,1989. L'utilisation des eaux usées en agriculture et en aquaculture :recommandations à avisées sanitaires. Organisation Mondiale de la Santé. Série de rapports techniques n° 778. OMS.

Laabassi, A. (2016):L'épuration des eaux usées par le système de lagunage à macrophytes, Thèse de doctorat, université Ferhat Abbas Sétif 1, 107.

Lapointe M., Lavoie A., Leboeuf M., 2014. Plantes de milieux humides et de bord de mer du Québec et des Maritimes. Chine : *Éditions Michel Quintin*.

Lazarin A., Lazarin G., 2011.Plantes aquatiques, eau pure. Éditions sang de la terre, 126p.

Références bibliographiques

Lazarova, V., & BRISSAUD, F. (2007). Intérêt, bénéfices et contraintes de la réutilisation des eaux usées en France: Réutilisation des eaux usées. *L'eau, l'industrie, les nuisances*, (299), 2939.

Lienard A., Guellaf H., Boutin C., 2000. Choix de sable pour les lits d'infiltration percolation Cemagref Lyon Qely. Ingénieries EAT, n° spécial assainissement, traitement des eaux.

Lotmani B., Mesnoua M., 2011. Effects of copper stress on antioxidative enzymes, chlorophyll and protein content in *Atriplexhalimus*. *African Journal of Biotechnology*. 10 (50), 1014310148.

Loué A., 1993. Oligoéléments en agriculture. Ed. Nathan, p45177.

M

M.Bensalimane, T. Mostfaoui, A. Hamimed, Z.T.Cherife, 2013, Performances épuratoires et intérêt du procédé de phytotraitement des eaux usées par des végétaux macrophytes, *Courrier du Savoir*, p(4751).

Maait, J. (1997). The Reuse of Wastewater for Irrigation. Literature Review, ENGREF Montpellier.

Mathieu C et Pieltain F, 2003, Analyse chimique des sols : méthodes choisies. Ed TEC et DOC. Paris. France.

Medjdoube T , 2014 : Etude ,conception et dimensionnement d' une STEP par filtre plantés de réseaux des eaux usées des zones éparées de la commune de Terny .

Medjdoub T., (2014) : «Etude, conception et dimensionnement d'une STEP

Mekhloufi. N,2003 : Etude des performances épuratoires du lagunage naturel et l'impact du cadmium sur ces performances. ensh blida 2003.

Metahri, M.S. (2012). Elimination simultanée de la pollution azotée et phosphatée des eaux usées traitées par des procédés mixtes. Cas de la STEP Est de la ville de TiziOuzou, Thèse de doctorat, université Mouloud Mammeri de TiziOuzou, 172p.

Mimeche, L. (2014). Etude de faisabilité de l'installation de station d'épuration des rejets urbains par les filtres plantés en milieu aride Application à la région de Biskra, thèse de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra.

Références bibliographiques

Molle.P, 2003: Waste water Treatment in Constructed wetlandswith horizontal subsurface flow (HF CWs) 407, 39313943.

P

Pauline M.S, 1995: Cours de procédé unitaires biologiques et traitement des eaux. Edition OPU, Ben Aknoun, Alger.

R

Rajaonarivelo, F., 2013. La faisabilité de la phytoépuration des eaux usées dans la ville de Toliara. Université de Toliara, 73p. + annexes [mémoire de DEA en biologie végétale]
Rakotoarisoa J.A., 1998. Mille ans d'occupation humaine dans le SudEst de Madagascar : Anosy, une île au milieu des terres. L'Harmattan, Repères pour Madagascar et l'Océan Indien, 203 p.

RAKOTOARISON H.A. 2008. Analyse de la qualité des eaux usées municipales dans la commune urbaine de Toliara: proposition de dimensionnement d'une station de lagunage. Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention de Diplôme d'Etudes Approfondies. Département de Chimie Minérale et de Chimie Physique. Faculté des Sciences Université d'Antananarivo 112 p.

Ramade F., 2000. Dictionnaire encyclopédique des polluants : les polluants de l'environnement à l'homme. Ed. International, Paris. 690p.

Rejsek, F. (2002) : Analyse des eaux: Aspects réglementaires et techniques. Scéren (CRDP AQUITAINE). Coll. Biologie technique. Sciences et techniques de l'environnement.

Rejsek, F. (2002). Analyse des eaux: Aspects réglementaires et techniques. Centre regional de documentation pédagogique d'Aquitaine (CRDP). Bordeaux. 358 p.

Resjeck.F., (2002). Analyse des eaux, aspects réglementaires et techniques. Edition : Scerene. p. 166198.

Rodier J, 2005 : L'analyse de l'eau: eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer. 8 Eme Edition. Dunod, Paris.

Rodier J, Bazin C, Broutin JP, Chambon P, Champsaur H, Rodi L. (2005). The analysis of water: natural water, wastewater, seawater 8ème édition. DUNOD. Paris, p. 1383.

Références bibliographiques

RODIER J, LEGUBE B, MERLET N, (2005) : L'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer, chimie, physicochimie, microbiologie, biologie, interprétation des résultats. Ed. Dunod, Paris, p: 1384.

Rodier J,et al. 2009: L'analyse de l'eau, 9e édition. DUNOD (éditeur), Paris, France.

Rodier, J., Bazin, C., Broutin, J. P., Chambon, P., Champsaur, H., &Rodi, L. (2005). Water analysis: natural waters, residual waters, sea waters. Dunod.

Rodier, J., Legube, B., &Merlet, N. (2009). L'Analyse de l'eau 9e édition. Entièrement mise à jour, Dunod, Paris.

S

Saggai M.M,2004: Contribution à l'étude d'un système d'épuration à plantes Macrophytes pour les eaux usées de La Ville de Ouargla.

Seghairi, N., Debabeche, M. (2011). Possibilités de rétention du cuivre et du zinc sur un filtre planté de papyrus, Communication orale, 3ème Edition du Congrès International sur Eau, Déchets et Environnement Fès Maroc.

Suschka J, Ferreira E,1986: Activated sludge respirometric measurements. Water Research

T

Tela Botanica., 2020. Base de Données Nomenclaturale de la Flore de France par Benoît Bock, BDNFF v4.02. (telabotanica.org).

Tiglyene, S., Mandi, L., et Jaouad, A. (2005). Enlèvement du chrome par infiltration verticale sur lits de *Phragmites australis* (Cav.) Steudel. Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science, 18(2), 177-198.

U

U.S. Environmental Protection Agency (USEPA). (2004). Guidelines for water use. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Center for Environmental Research Information, Cincinnati, Ohio (USA).

Urios. L, (2005). Technique D'épuration des eaux usées. Technique et documentation. Paris.

Vymazal, J. (2007). Removal of nutrients in various types of constructed wetland. Sci. Total Environ. 380, p.48-65.

W

Références bibliographiques

Wiegand G., 1988. Analysis of flora and vegetation in rivers: concepts and applications. *In: Vegetation of inland waters. Symoens J.J. Ed. Dordrecht, Kluwer.* p.311340.

Yvan S. J, Cécile T, Michel J, 2002: Dossier «Assainissement autonome. Histoires d'eau usée », revue la maison écologique n° 8.

