



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 Sciences de la Nature et de la Vie
Département des êtres vivants
Domaine des Sciences de la Nature et de la Vie



Mémoire

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Master LMD

En : Biotechnologie

Option : BIOTECHNOLOGIE VÉGÉTALE

Par : Boukehil Mostapha
Messabhia Badreddine

Intitulée

Etude de
L'importance des plantes phytoépuration
(eaux usées et sols)

Devant le jury :

- Dr Mehalaine.S	Présidente	Université de Tébessa
- Dr Segheir.H	Examinatrice	Université de Tébessa
- Dr Boudjabi.S	Promoteur	Université de Tébessa

Date de soutenance
13 Juin 2022

REMERCIEMENTS

Je remercie Dieu tout-puissant de m'avoir accordé la force, le courage et les moyens à fin de pouvoir accomplir ce travail.

Je remercie infiniment mes parents pour leur soutien et leur encouragement depuis toujours.

Je remercie tout particulièrement mon encadreur Madame le professeur **S.Boudjabi** pour ces orientations, ses conseils et l'aide qu'elle ma donnée.

Je vous remercie infiniment madame pour le temps que vous, m'avez accordé

Je tiens également à remercier les membres du jury

Dr Mehalaine.S Présidente

Dr Segheir.H Examinatrice

Dr Boudjabi.S Promoteur

Je tiens aussi à remercier

M^{me} Djellab.S Chef de département d'être vivants

M^{er} Fatmi.H Maitre de conférences

Je remercie chaleureusement mes amis intimes Dr Bouaffen Abdelkarim responsable de spécialité département ST, et Dr Adel Toulba chef de département des sciences commerciales, Univ-Tébessa, qui m'ont toujours soutenue et encouragée au cours de la réalisation de ce mémoire.

Enfin, je remercie tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin dans l'élaboration de ce travail.

LISTES DES TABLEAUX

Tableau	Titre	Page
N°01	Les bactéries pathogènes dans les eaux usées	09
N°02	Les virus dans les eaux usées	10
N°03	Les parasites pathogènes dans les eaux usées	11
N°04	Normes de rejets internationales (Baumant ,1997)	12
N°05	Normes de rejets des effluents liquides selon (Jorad,1995)	12
N°06	Germes pathogènes rencontrés fréquemment dans les eaux usées et effet sur la santé humaine (Moufouk, 2007)	13
N°07	Statut acido-basique des sols ; adapté de Lano (2019)	48
N°08	Quelques propriétés biologiques du sol (Delgado, 2016)	49
N°09	Association de quelques polluants aux mécanismes de phytoremédiation	54

LISTES DES FIGURES

Figure	Titre	Page
N°01	Principes de l'épuration dans un bassin à macrophytes (Rakotoarison, 2008)	20
N°02	<i>Papyrus « papier ».</i> (Rajaonarivelo, 2012)	22
N°03	<i>Le roseau commun « Phragmite Australis ».</i> (Rajaonarivelo, 2013)	23
N°04	<i>Typha Latifolia « massette à larges feuilles »</i> (Tostain, 2011)	23
N°05	Schéma des filtres plantés de à écoulement verticale. (Bris, 1997)	25
N°06	Schéma d'un filtre planté de à écoulement horizontale. (Bris, 1997)	27
N°07	Coupe transversale schématique d'un filtre à écoulement hybride (Hendrik, 2008)	27
N°08	Schéma D'une station d'épuration classique. (Racault,1996)	33
N°09	Schéma d'épuration des eaux usées par lagunage naturel (www.lagunage.eu)	39
N°10	Les différents mécanismes de la phytoremédiation des sols(Alchimia, 2016)	51
N°11	<i>Eleusine indica (Linnaeus).</i> (Jstor plants, 2016)	57
N°12	<i>Cleome ciliata Schumach.</i> (Tela Botanica,2021)	57
N°13	<i>Cynodon dactylon (L).</i> (catalogue of life,2020)	59

LISTES ABRÉVIATIONS

ADE	Algérienne des Eaux
CE	Conductivité Electrique
DBO	Demande Biochimique En Oxygène
DCO	Demande Chimique En Oxygène
FAO	Food And Agriculture Organisation
JORA	Journal Officiel De La République Algérienne
MES	Matières En Suspension
MMS	Matières Minéral En Suspension
MVS	Matières Volatiles En Suspension
NT	Azote Totale
OMS	Organisation Mondiale De La Santé
PT	Phosphore Totale
PH	Potentiel Hydrogéné
STEP	Station D' Epuratoin
T	Température
DBO5	Demande Biochimique En Oxygène
ETM	Elément Trace Métallique
K	Conductivité Hydraulique
°C	Degré Celcius
µg	Microgramme
nm	Nanomètre
Pb	Plomb
PS	Poids Sec
KCl	Chlorure de Potassium
NO3	Nitrate

SOMMAIRE

N°	Titre	Page
-	Remerciements	I
-	Listes des tableaux	II
-	Listes des figures	II
-	Listes abréviations	IV
-	Résumé	X

CHAPITRE I GENERALITE SUR LES EAUX USEES

N°	Titre	Page
I.1	Introduction	01
I.2	Définition des eaux usées	03
I.3	Origine et nature de l'eau usée	03
I.3.1	Les eaux usées domestiques	03
I.3.2	Les eaux usées industriels	04
I.3.3	Les eaux usées agricoles	04
I.4	Définition de la pollution de l'eau	04
I.5	Les différents types de pollution des eaux	05
I.5.1	La pollution domestique	05
I.5.2	La pollution industrielle	05
I.5.3	La pollution agricole	06
I.6	Les paramètres de pollution de l'eau	06
I.6.1	Les paramètres physiques	06
I.6.1.1	La Température	06
I.6.1.2	Les matières en suspension	06
I.6.2	Les paramètres chimiques	07
I.6.2.1	Potentiel hydrogène (pH)	07
I.6.2.2	Conductivité électrique(CE)	07
I.6.2.3	Oxygène dissous	07

I.6.2.4	Demande biochimique en oxygène (DBO5)	07
I.6.2.5	Demande chimique en oxygène(DCO)	07
I.6.2.6	L' azote	07
I.6.2.7	Phosphore	08
I.6.2.8	Les nitrates	08
I.6.2.9	Les métaux lourds	08
I.6.3	Les paramètres biologiques	08
I.7	Normes des eaux de rejets	12
I.7.1	Normes internationales	12
I.7.2	Norme nationale selon le JORAD	12
I.8	Les conséquences de la pollution des eaux	13
I.8.1	Les conséquences sanitaires	13
I.8.2	Conséquences écologiques	13
I.8.3	Conséquences agricoles	13
I.8.4	Conséquences esthétiques	14
I.8.4	Conséquences industrielles	14
I.9	Systèmes de collecte des eaux usées	14
I.9.1	Système unitaire	14
I.9.2	Système séparatif	14
I.10	Conclusion	15

CHAPITRE II LA TECHNIQUE DE LA PHYTOEPURATION

II.1	Introduction	17
II.2	Définition de la phytoépuration	17
II.3	Historique de la Phytoépuration	17
II.4	Les paramètres influençant la phytoépuration	18
II.5	Le principe de l'épuration par des plantes	20
II.6	Rôles majeurs des macrophytes	21
II.6.1	La Partie des plantes	21
II.6.2	La Partie immergée	21
II.6.3	Racines et rhizomes dans les sédiments ou les dépôts de surface	21
II.6.4	Les plantes phytoépuration et leurs caractéristiques	22
II.6.4.1	Le papyrus (<i>Cyperus papyrus</i> L.)	22
II.6.4.2	Le Roseau commun, (<i>Phragmites australis</i>)	22
II.6.4.3	La massette à larges feuilles (<i>Typha latifolia</i>)	23
II.6.5	Le rôle du substrat	24
II.6.6	Oxygénation de la rhizosphère	24
II.6.7	Ancrage des microorganismes	24
II.7	Les types de filtres plantés	25
II.7.1	Les filtres plantés à écoulement vertical	25
II.7.2	Les filtres plantés à écoulement horizontal	26
II.7.3	Les systèmes hybrides	27
II.8	L'avantage et inconvénient de la phytoépuration	28
II.8.1	Les avantages de la phytoépuration	28
II.8.2	Les inconvénients de la phytoépuration	28
II.9	Conception d'une station par la phytoépuration	28
II.9.1	Le dimensionnement du bassin	29
II.9.2	Contrôle de la station d'épuration	29
II.10	La phytoépuration en Algérie	29
II.11	Conclusion	30

CHAPITRE III COMPARAISON ENTRE L'EPURATION CLASSIQUE ET LE LAGUNAGE		
III.1	Introduction	33
III.2	L'épuration classique des eaux usées	33
III.2.1	Les procédés d'épuration classique des eaux usées	33
III.2.1.1	Le traitement préliminaire	33
III.2.1.1.1	Le dégrillage	34
III.2.1.1.2	Le dessablage	34
III.2.1.1.3	Le déshuilage	34
III.2.1.2	Le traitement primaire	35
III.2.1.3	Le traitement secondaire (traitement biologique)	35
III.2.1.3.1	Les boues activés	35
III.2.1.3.2	Lit bactérien	36
III.3	Le lagunage	37
III.3.1	Le lagunage naturel	38
III.3.2	Le lagunage aéré	40
III.3.3	Influence des conditions climatiques sur les performances du lagunage	40
III.4	L'avantages et inconvénients du lagunage naturel	41
III.5	Conclusion	42

CHAPITRE IV LA PHYTOREMEDIATION DU SOL ET LES TECHNIQUES DE DEPOLLUTION DES SOLS		
IV	Introduction	44
IV.1	La pollution	44
IV.2	Définition de la pollution	44
IV.3	Les sources de la pollution	44
IV.4	La pollution des sols	44
IV.5	Source de la pollution des sols	44
IV.5.1	Par le fond pédo-géochimique naturel	45
IV.5.2	Par voie atmosphériques	45

IV.5.3	Par épandage des déchets	45
IV.5.4	Avec les apports de phosphates	45
IV.5.5	Au sein de sites pollués	45
IV.6	Généralités sur les sols	45
IV.7	Définition et caractéristiques générales d'un sol	45
IV.7.1	Propriétés physiques du sol	46
IV.7.2	Propriétés chimiques du sol	47
IV.7.3	Propriétés biologiques du sol	48
IV.8	La dépollution Du Sol	50
IV.9	La phytoremédiation	50
IV.10	Les différentes technique de phytoremédiation des sols	51
IV.10.1	La phytoextraction	51
IV.10.2	La rhizofiltration	52
IV.10.3	La phytostabilisation	52
IV.10.4	La phytovolatilisation	52
IV.10.5	La phytodégradation	52
IV.11	Le critère de sélection des plantes phytoremédiatrices	52
IV.12	Les caractéristiques spécifiques aux espèces végétales testées dans cette étude	56
IV.12.1	Eleusine indica (Linnaeus) Gaertner (Poaceae)	56
IV.12.2	Cleome ciliata Schumach. Thonn. (Capparaceae)	57
IV.12.3	Cynodon dactylon (L.) Pers. (Poaceae)	58
IV.13	Les avantages et les inconvénients de la phytoremediation	59
IV.13.1	Les avantages	59
IV.13.2	Les inconvénient	60
IV. 14	Conclusion	61

Résumé

L'objectif de ce travail est de mettre en évidence les potentialités et l'importance de quelques plantes phytoépurations, à épurer les eaux usées,

Dans les trois premiers chapitres nous avons présenté une revue de la littérature, concernant des généralités sur les eaux usées et les techniques d'épuration d'une manière générale et la phytoépuration en particulier.

La phytoépuration veut dire l'opération de l'épuration des eaux usées en présence de plantes. Elle peut être réalisée à travers différents systèmes, caractérisé par le fait que l'eau vient couler lentement et sous des conditions contrôlées à l'intérieur de milieux contenant des espèces végétales, ce qui favorise l'épuration naturelle, qui s'effectue grâce au processus d'aération, sédimentation, absorption et métabolisation de la part des microorganismes et de la flore.

Les systèmes de phytoépuration sont utilisés pour la dépuración d'eaux de différentes provenances et avec des caractéristiques multiples. Par rapport aux méthodes traditionnelles, cette méthode demande une grande surface mais nécessite moins d'énergie et de technologie. Les systèmes de phytoépuration peuvent être uniques ou en batterie. Une série de lits de gravier végétée à écoulement horizontal à travers laquelle s'écoulent les rejets de manière continue, ou hybride (ex. un lit à écoulement horizontal suivi par un autre à écoulement vertical).

Les résultats obtenus à l'issue de cette étude bibliographique montrent que les plantes phytoépurations, le *Phragmite australis*, *Typha latifolia* et le *Papyrus cypurus* semblent être plus rentable pour l'élimination de tous les polluants des eaux usées domestique. Le *Typha latifolia* est très rentable pour l'élimination de l'azote ammoniacale et les phosphates. *Phragmite australis*, *Typha latifolia*, *Papyrus cypurus* sont efficaces dans l'élimination des germes totaux, des coliformes totaux, des coliformes fécaux et des streptocoques. D'une façon générale, les filtres plantés de macrophytes sont un meilleur moyen d'assurer de bons abattements des polluants des eaux usées.

La présence des plantes macrophytes améliore les rendements épurations et réduit les problèmes de colmatage des eaux usées. Ces différentes plantes sont aussi utilisées dans la remédiation des sols pollués. Ces espèces végétales sont très efficaces surtout dans la dépollution et extraction des métaux lourds qui affectent les propriétés physicochimiques du sol.

Mots clés : Phytoremédiation , eau usée , sols pollués, filtre planté, phytoépuration.



**INTRODUCTION
GENERALE**

Introduction Générale

Avec le développement de la population humaine, les milieux aquatiques ont servi de plus en plus de récepteurs des effluents domestiques avec des conséquences sans cesse plus visibles. La protection croissante des cours d'eau a donc conduit depuis un peu plus d'un siècle à la création de systèmes d'épuration maintenant bien connus.

A cet effet, Les eaux d'égout domestiques doivent être épurées avant leur rejet directement dans le milieu naturel à savoir ruisseaux, rivières et lacs. Cette épuration s'effectue dans des stations d'épuration à l'aide de bactéries qui détruisent les eaux polluées avant qu'elles ne soient rejetées. Elles transforment par la suite cette pollution en un sous- produit appelé « boues » qui sont ensuite épandues peut être comme engrais et matière organique sur les terrains agricoles (cemagref. satese, ensp, agence de l'eau, 1997).

Les stations d'épuration classiques que l'on rencontre dans les villes demandent une grande technicité et une exploitation complexe et coûteuse notamment en matière d'énergie électrique. En particulier, l'évacuation régulière des boues est une contrainte forte qui, si elle n'est pas respectée, peut entraîner un dysfonctionnement de l'installation et donc à un rejet de la pollution mal traitée.

L'amélioration des connaissances dans ce domaine a fortement contribué à la conception de nouveaux systèmes d'épuration des eaux s'inspirant des processus naturels, dénommés « marais artificiels » Les stations d'épuration conçues selon le principe des « lagunes d'épuration » ou des « marais artificiels » constituent donc une solution importante pour le milieu rural et sont adoptées depuis plusieurs dizaines d'années par de nombreuses collectivités (cemagref. satese, ensp, agence de l'eau, 1997). Les potentialités épuratoires des plantes aquatiques et plus particulièrement du roseau ont été mises en évidence par Seidel dès 1946 pour traiter des effluents industriels contenant des substances chimiques tels que les phénols, les chlorophénol et les métaux lourds. Depuis, cette nouvelle technologie extensive a été exploitée avec succès par plusieurs auteurs (Finlayson ; Chick, 1983 ; Biddlestone ; al., 1991 ; Brix, 1993) pour le traitement de plusieurs types d'effluents.

L'objectif de ce travail est de mettre en évidence les potentialités et les importances de quelques plantes phytoépurations, à épurer les eaux usées, pour l'amélioration de la qualité des eaux usées. Cette étude se présente en quatre chapitres.

- **Le premier chapitre** : Seront présentées, dans un premier chapitre, des généralités sur les eaux usées, les différents types de pollutions, les paramètres de pollution et sur les conséquences de cette dernière sur la santé publique et sur l'environnement

- **Le deuxième chapitre** : Porte essentiellement sur les connaissances et les généralités sur la technique de phytoépuration et en particulier sur les filtres plantés de végétaux macrophytes tel que les filtres plantés à écoulement vertical et ceux à écoulement horizontale.

Introduction Générale

- **Le troisième chapitre :** Dans ce chapitre, nous avons fait une comparaison entre l'épuration classique et le lagunage, Et à travers elle nous avons touché beaucoup des points importants, Épuration classique des eaux usées, Traitement préliminaire, Le lagunage naturel, Avantages et inconvénients du lagunage naturel.

- **Le quatrième chapitre :** Dans ce chapitre, nous avons voulu étudier la phytoremédiation du sol et les techniques de dépollution des sols, Nous avons mis en évidence quelques points importants, la Pollution des sols, généralités sur les sols, la dépollution du sol, la phytoremediation.



CHAPITRE I
GENERALITE SUR LES
EAUX USEES

I.1. Introduction

Les eaux usées de mauvaise qualité peut présenter des risques sérieux pour la santé publique et l'environnement, la quantité de contaminants qui parvient dans l'environnement se nomme la charge excrétée. Sa composition dépend de la population à l'origine de la production des eaux usées, et notamment de la proportion d'individus infectés et des conditions d'hygiène.

I.2. Définition des eaux usées

Une eau est dite usée ou polluée une fois qu'elle perd ses caractéristiques physiques, chimiques et organoleptiques (Audic et Esser.,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.,1980 et Benneton.,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)

I.3.Origine et nature de l'eau usée

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

I.3.1.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 et 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, protides), 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.

I.3.2. 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).

I.3.3. Les eaux usées agricoles

Les eaux d'origine agricoles sont constituées essentiellement des eaux de drainage des champs agricoles et des rejets de lavage des fermes d'élevage. Il s'agit d'un mélange de composés relativement biodégradable. Néanmoins, ces eaux sont parfois caractérisées par de fortes concentrations de pesticides et d'engrais artificiels. Les paramètres qui doivent être pris en considération sont l'azote nitrique, le phosphate et les substances organiques.

L'agriculteur est conduit à utiliser divers produits d'origine industrielle ou agricole dont certains présentent ou peuvent présenter, des risques pour l'environnement et plus particulièrement pour la qualité des eaux. Il s'agit principalement :

- Des fertilisants (engrais minéraux du commerce ou déjections animales produites ou non sur l'exploitation) ;
- Des produits phytosanitaires (herbicides, fongicides, insecticides,...) (Grosclaude.,1999).

I.3.4. Les eaux usées pluviales

Ce sont les eaux de ruissellement qui se forment après une précipitation, elles peuvent être particulièrement polluées (Franck.,2002). Les eaux de pluie ruissellent dans les rues où sont accumulées polluants atmosphériques, poussières, détritrus, suies de combustion et hydrocarbures rejetés par les véhicules. (Metahri.,2012)

I.4. Définition de la pollution de l'eau

La pollution de l'eau est définie comme étant une dégradation de sa qualité naturelle due aux rejets continus de produit nuisibles en concentration excessives. En effet, L'eau peut dissoudre, souvent avec facilité, de nombreuses substances chimiques minérales ou organiques.

A la différence de divers phénomènes de pollution, celle des eaux qui se traduit par des effets alternatives qui rend son utilisation dangereuse et perturbe l'écosystème aquatique (rivières.,2005).

I.5. Les différents types de pollution des eaux :

La pollution de l'eau est une altération qui rend son utilisation dangereuse et perturbe l'écosystème aquatique. Les origines sont multiples : Les villes, Les industries, L'agriculture, les décharges de déchets domestiques et industriels.

La pollution d'une eau possède essentiellement quatre types sont la pollution domestique, la pollution industrielle, la pollution agricole, et la pollution diffuse (Cherrak et Bendia.,2006)

Il existe cinq types de pollution dans les eaux usées :

I.5.1. La pollution domestique

Dans le cas des rejets domestiques, la pollution est de nature minérale et bactériologique. Mais elle est surtout due aux matières organiques qui provoquent l'eutrophisation du milieu récepteur : l'ammoniaque des détergents et les phosphates des lessives sont autant de nutriments pour les algues, qui prolifèrent et deviennent des substances organiques supplémentaires (Niati et Chemirik.,2013).

La pollution journalière produite par une personne utilisant de 150 à 200 litres d'eau est évaluée entre :

- ✓ 70 à 90 grammes de matières en suspension.
- ✓ 60 à 70 grammes de matières organiques.
- ✓ 15 à 17 grammes de matières azotées.
- ✓ 4 grammes de phosphore.
- ✓ plusieurs milliards de germes pour 100 ml (Richard.,1996).

I.5.2. La pollution industrielle

Parmi les pollutions industrielles, on peut distinguer les pollutions de nature organique, assimilables aux pollutions domestiques et celles de nature toxique du fait de la présence de métaux ou substances chimiques dangereuses spécifiques (Youcefi et Bouosla.,2012).

En plus des matières organiques, azotées ou phosphorées, elles sont chargées en différentes substances chimiques organiques et métalliques. Selon leur origine industrielle elles peuvent également contenir :

- ✓ Des graisses (industries agroalimentaires, équarrissage);
- ✓ Des hydrocarbures (raffineries);
- ✓ Des métaux (traitements de surface, métallurgie);
- ✓ Des acides, des bases et divers produits chimiques (industries chimiques divers, tanneries) (Metahri,2012).

I.5.3. La pollution agricole

Provenant des fermes ou des cultures, elle se caractérise par de fortes teneurs en sels minéraux (Azote, Phosphore, Potassium), provenant des engrais, des pesticides qui altèrent la qualité des nappes souterraines vers lesquelles ils sont entraînés (Menouer.,2014).

I.5.4. Pollution microbiologique

Les eaux usées contiennent une multitude de microorganismes vivants, des virus, des bactéries, des protozoaires, voire même des parasites. La grande majorité de ces microorganismes nocifs, susceptibles d'engendrer des infections humaines redoutables, diffuse dans l'environnement hydrique par l'intermédiaire de souillures fécales humaines ou animales (Ansoia.,1995).

I.5.5. La pollution diffuse

Une pollution diffuse est une pollution due à de multiples rejets de polluants dans le temps et dans l'espace. Contrairement à une pollution accidentelle, qui se produit localement, ponctuellement et souvent massivement, une pollution diffuse est peu visible. Son effet sur l'environnement n'en est pas moins sensible.

La pollution des eaux par les nitrates et les pesticides de l'agriculture est un exemple de pollution diffuse elle se produit sur le territoire, d'année en année et affecte grandement la qualité des eaux et les écosystèmes (Houari et Kherroui.,2007).

I.6. Les paramètres de pollution de l'eau

I.6.1. Les paramètres physiques

I.6.1.1. Température

Il est important de connaître la température de l'eau avec une bonne précision. En effet, celle-ci 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 et des mélanges éventuels, etc.

La température est un facteur écologique important des milieux aqueux. Son élévation peut perturber fortement la vie aquatique (pollution thermique). Elle joue un rôle important dans la nitrification et la dénitrification biologique (Rodier et al.,2005).

I.6.1.2. Matières en suspension

Les matières en suspension (MES) sont, en majeure partie, de nature biodégradable. La plus grande part des microorganismes pathogènes contenus dans les eaux usées, est associée aux MES (FAO., 2003). Elles représentent, la fraction constituée par l'ensemble des particules organiques (MVS) ou minérales (MMS)

I.6.2. Les paramètres chimiques

I.6.2.1. Potentiel hydrogène (pH)

Le pH est la mesure de la concentration en ions hydrogène (H^+) de la solution, il est mesuré à l'aide d'un pH-mètre. Le pH joue un rôle important dans l'épuration d'un effluent et le développement bactérien (Rodier.,1996)

I.6.2.2. Conductivité électrique(CE)

La conductivité est la propriété que possède une eau à favoriser le passage d'un courant électrique. Elle fournit une indication précise sur la teneur en sels dissous (salinité de l'eau). (REJSEK.,2002). La conductivité donne une idée de la minéralisation d'une eau; L'unité de la conductivité est le Siemens par mètre (S/m) (Rodier et al.,2005).

I.6.2.3. Oxygène dissous

L'oxygène dissous (O_2) est très important par le fait qu'il conditionne l'état de plusieurs sels minéraux, la dégradation de la matière organique et la vie des animaux aquatiques.

L'oxygène, toujours présent dans l'eau, n'en est pas un élément constitutif. Sa solubilité est fonction de la température, de la pression partielle dans l'atmosphère et de la salinité (Ladjel et Bouchefer., 2005).

I.6.2.4. Demande biochimique en oxygène (DBO5)

Elle correspond à la quantité d'oxygène consommée en 5 jours par une biomasse pour décomposer les matières organiques. Elle est mesurée à partir d'un DBO mètre, et exprimée en $mg\ O_2/ l$. L'échantillon est incubé dans l'enceinte thermostatée à $20^\circ C$ en présence d'air. Les microorganismes présents, consomment l'oxygène en provenance du volume d'air situé au dessus de l'échantillon. La mesure de cette perte en oxygène est effectuée durant cinq jours (Baumont.,1997) .

I.6.2.5. 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 $150^\circ C$. Elle est exprimée en $mg\ O_2/l$. (Suschka et Ferreira.,1986).

I.6.2.6. L'azote

Dans une eau résiduaire « fraîche », l'azote est essentiellement contenu dans les protéines et l'urée mais au cours du séjour dans le réseau d'égouts, une forte proportion de l'azote organique est hydrolysée en ammoniaque. À l'entrée de la station, l'azote se répartit typiquement en ammoniaque

(60 à 75 %) et en azote organique (25 à 40 %) sous forme soluble et particulaire. Les sources d'azote susceptibles d'être utilisées par les différents micro-organismes incluent pratiquement toutes les sources d'azote organique et minéral (Andriamirado et al., 2005).

I.6.2.7. Le phosphore

Le phosphore est présent dans les eaux usées, soit sous forme d'orthophosphates, soit sous forme de polyphosphates ou de phosphore organique. Ce phosphore est incorporé essentiellement dans les acides nucléiques, les phospholipides et les polymères des parois bactériennes. Dans certains cas particuliers, il peut être stocké dans la cellule, sous des formes diverses (Andriamirado et al., 2005).

I.6.2.8. Les nitrates

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 naturelles ne dépassent pas 3 mg /l dans les eaux

les 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).

I.6.2.9. Les métaux lourds

Les éléments nocifs les plus importants sont les métaux lourds. Leur principale origine est industrielle. Le cuivre, le zinc, le cadmium, le chrome, le plomb, le mercure, le nickel sont les polluants les plus fréquemment rencontrés (Bachi.,2010).

I.6.3. Les paramètres biologiques

Les eaux résiduaires urbaines transportent de nombreux microorganismes dont certains sont pathogènes (bactéries, virus et parasites).

Les germes les plus fréquemment rencontrés sont les salmonelles, les coliformes fécaux, les staphylocoques, les streptocoques, les helminthes,...ext (Bachi.,2010).

Tableau N°01. Les bactéries pathogènes dans les eaux usées

Agent pathogène	Symptômes, maladie	Nombre pour un litre d'eau usée	Voies de contamination principales
<i>Salmonella</i>	Typhoïde, paratyphoïde	23 à 80 000	Ingestion
<i>Shigella</i>	Dysenterie bacillaire	10 à 10 000	Ingestion
<i>E. coli</i>	Gastro-entérite	37 000	Ingestion
<i>Yersinia</i>	Gastro-entérite	37 000	Ingestion
<i>Campylobacter</i>	Gastro-entérite	37 000	Ingestion
<i>Vibrio</i>	Choléra	100 à 100 000	Ingestion
<i>Leptospira</i>	Leptospirose	100 à 100 000	Cutanée/Inhalation/Ingestion
<i>Legionella</i>	Leptospirose		Ingestion
<i>Mycobacterium</i>	Tuberculose	100 à 100 000	Ingestion

Source : adapté d'Asano (1998) et du site Internet du ministère de la Santé du Canada (www.hc-sc.gc.ca)

Tableau N°02. Les virus dans les eaux usées

Agent pathogène	Symptômes, maladie	Nombre pour un litre d'eau usée	Voies de contamination principales
<i>Virus de l'hépatite A</i>	Hépatite A		Ingestion
<i>Virus de l'hépatite E</i>	Hépatite E		Ingestion
<i>Rotavirus</i>	Vomissement, diarrhée	400 à 85 000	Ingestion
<i>Virus de Norwalk</i>	Vomissement, diarrhée		Ingestion
<i>Adénovirus Ingestion</i>	Maladie respiratoire, conjonctivite vomissement, diarrhée		Ingestion
<i>Astrovirus</i>	Vomissement, diarrhée		Ingestio
<i>Calicivirus</i>	Vomissement, diarrhée		Ingestio
<i>Coronavirus</i>	Vomissement, diarrhée inhalation		Ingestion inhalation
<i>Réovirus</i>	Affection respiratoire bénigne et diarrhée		Ingestio
Entérovirus			
<i>Poliovirus</i>	Paralyse, méningite, fièvre	182 à 492 000	Ingestio
<i>Coxsackie A</i>	Méningite, fièvre, pharyngite, maladie respiratoire		Ingestio
<i>Coxsackie B</i>	Myocardite, anomalie congénitale du cœur (si contamination pendant la grossesse), éruption cutanée, fièvre, méningite, maladie respiratoire		Ingestio
<i>Echovirus</i>	Méningite, encéphalite, maladie respiratoire, rash, diarrhée, fièvre		Ingestio
<i>Entérovirus 68-71</i>	Méningite, encéphalite, maladie respiratoire, conjonctivite hémorragique aiguë, fièvre		Ingestio

Source : adapté d'Asano (1998) et du site Internet du ministère de la Santé du Canada (www.hc-sc.gc.ca)

Tableau N°03. Les parasites pathogènes dans les eaux usées

Organisme	Symptômes, maladie	Nombre pour un litre	Voies de contamination principales
Protozoaires			
<i>Entamoeba histolytica</i>	Dysenterie amibienne	4	Ingestion
<i>Giardia lamblia</i>	Diarrhée, malabsorption	125 à 100 000	Ingestion
<i>Balantidium coli</i>	Diarrhée bénigne, ulcère du colon	28-52	Ingestion
<i>Cryptosporidium</i>	Diarrhée	0,3 à 122	Ingestion
<i>Toxoplasma gondii</i>	Toxoplasmose: ganglions, faible fièvre		Inhalation / Ingestion
<i>Cyclospora</i>	Diarrhée, légère fièvre, perte de poids		Ingestion
<i>Microsporidium</i>	Diarrhée		Ingestion
Helminthes			
<i>Ascaris</i>	Ascariadiase : diarrhée, troubles nerveux	5 à 111	Ingestion
<i>Ancylostoma</i>	Anémie	6 à 188	Ingestion / Cutanée
<i>Necator</i>	Anémie		Cutanée
<i>Tænia</i>	Diarrhée, douleurs musculaires	10 à 41	Ingestion de viande mal cuite
<i>Trichuris</i>			Ingestion
<i>Toxocora</i>	Diarrhée, douleur abdominale		Ingestion
<i>Strongyloïdes</i>	Fièvre, douleur abdominale		Cutanée
<i>Hymenolepis</i>	Diarrhée, douleur abdominale, nausée		Ingestion
	Nervosité, troubles digestifs, anorexie		

Source : adapté d'Asano (1998) et du site Internet du ministère de la Santé du Canada (www.hc-sc.gc.ca)

I.7. Normes des eaux de rejets

I.7.1. Normes internationales

Tableau N°04: Normes de rejets internationales (Baumant.,1997).

Caractéristiques	Normes utilisées (OMS)
PH	6.5-8.5
DBO5	< 30 mg/l
DCO	< 90 mg/l
MES	< 20 mg/l
NH4+	< 0.5 mg/l
NO2	1 mg/l
NO3	< 1 mg/l
P2O5	< 2 mg/l
Température	< 30°C
Couleur	Incolore
Odeur	Inodore

I.7.2. Norme nationale selon le JORAD

Tableau N°05: Normes de rejets des effluents liquides selon (Jorad.,1995)

Eléments	Unités	Valeurs limites
Température	°C	30
PH	-	6.5-8.5
DBO5	mg/l	30
DCO	mg/l	120
MES	mg/l	35
Azote total	mg/l	30
Phosphor total	mg/l	10
Furfural	mg/l	50
Hydrocarbures	mg/l	10
Plomb	mg/l	0.5
Fer	mg/l	3
Mercure	mg/l	0.01
Cuivre	mg/l	0.5
Plomb	mg/l	0.5
Zinc	mg/l	3

Tableau N°06: Germes pathogènes rencontrés fréquemment dans les eaux usées et effet sur la santé humaine (Moufouk., 2007).

Germes	Organisme	Maladie
<ul style="list-style-type: none"> • Bactéries pathogènes • Entérobactéries • Vibrions 	Salmonelles Shigelles Colibacilles Leptospires Mycobactéries Vibrio coma	Typhoïde Dysenterie Tuberculose Choléra
<ul style="list-style-type: none"> • Virus 	Entérovirus Réovirus Adénovirus Rotavirus	Poliomyélite Méningite Affections respiratoires Diarhées
<ul style="list-style-type: none"> • Parasites 	Champignons Taenia	Cysticercoses Eczémas, maladies de la peau

I.8. Conséquences de la pollution des eaux

Les conséquences de la pollution peuvent être classées en cinq catégories principales (Ladjel et Bouchefer.,2005).

I.8.1. Conséquences sanitaires

Ce sont celles qui ont trait à la santé des populations. Elles sont donc à prendre en compte en priorité. Le tableau N°03 présente l'effet nocif des germes pathogènes pouvant exister dans les eaux usées.

I.8.2. Conséquences écologiques

Elles ont trait à la dégradation du milieu naturel. Les conséquences écologiques se mesurent en comparant l'état du milieu pollué par rapport à ce qu'il aurait été sans pollution. Ceci n'a rien d'évident, la pollution se traduisant parfois uniquement par l'accentuation d'un phénomène naturel. D'une manière générale, les conséquences écologiques sont à considérer au travers de la réduction des potentialités d'exploitation du milieu (pêche, aquaculture, tourisme...) (Baumont.,2000).

I.8.3. Conséquences agricoles

L'eau est, dans certaines régions, largement utilisée pour l'arrosage ou l'irrigation, souvent sous forme brute (non traitée). La texture du sol, sa flore bactérienne, les cultures et le bétail, sont sensibles à la qualité de l'eau. De même, les boues issues de traitement des eaux usées pourront, si elles contiennent des toxiques (métaux lourds) être à l'origine de la pollution des sols (Baumont., 2000).

I.8.4. Conséquences esthétiques

Cette troisième catégorie de conséquences, peut-être la plus subjective. Il s'agit de pollution n'ayant pas de conséquences sanitaires ou écologiques importantes, mais perturbant l'image d'un milieu : par exemple, des bouteilles plastiques ou du goudron rejeté sur une plage ou sur la chaussée de la route.

I.8.5. Conséquences industrielles

L'industrie est un gros consommateur d'eau, il faut par exemple 1m³ d'eau pour produire 1 kg d'aluminium. La qualité requise pour les utilisations industrielles est souvent très élevée, tant sur le plan chimique (minéralisation, corrosion, entartrage), que biologique (problèmes d'encrassement des canalisations par des organismes). Le développement industriel peut donc être stoppé par la pollution; c'est une des raisons pour laquelle la préoccupation pour la pollution est apparue d'abord dans les pays industrialisés.

I.9. Systèmes de collecte des eaux usées

Les systèmes de collecte les plus utilisés en assainissement sont deux types unitaire et séparatif (Baumont.,2000 et Mamadou.,2005).

I.9.1. Système unitaire

Ce réseau collecte l'ensemble des eaux noires, claires et grises d'une ville ou d'une région. Les avantages de ce système sont la conception simple dont il est constitué d'un seul collecteur avec un seul branchement ainsi que pas de risque d'inversion de ce dernier. Les inconvénients sont lors d'un orage, les eaux usées sont diluées par les eaux pluviales avec l'apport de sable important à la station d'épuration (Baumont.,2000 et Mamadou.,2005).

I.9.2. Système séparatif

Ce système consiste à spécialiser chaque réseau selon la nature des effluents. Le réseau d'évacuation des eaux usées domestiques et parfois industrielles (selon leurs caractéristiques) est séparé du réseau d'évacuation des eaux de pluie qui sont rejetées le plus souvent, directement dans le milieu récepteur (mer, fleuve ou lac). Ce système à l'avantage de permettre l'assurance d'un régime permanent dans les STEP et la diminution du diamètre moyen du réseau de collecte des eaux usées. L'inconvénient réside dans le coût élevé d'investissement (Baumont.,2000 et Mamadou.,2005).

Conclusion

Il faut retirer des eaux usées un maximum de déchets, avant de les rejeter dans l'environnement, pour que leur incidence sur la qualité de l'eau, en tant que milieu naturel aquatique et son environnement, soit la plus faible possible.

Quand les eaux usées ou les eaux résiduaires industrielles ne sont pas épurées avant rejet dans le milieu naturel, l'altération de ce dernier et les déséquilibres qui s'y produisent ont non seulement des effets immédiats sur les utilisations de l'eau, mais aussi des effets à long terme, parfois irréversibles dans le domaine de la vie.



CHAPITRE II
LA TECHNIQUE DE LA
PHYTOEPURATION

II.1. Introduction

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).

II.2. 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).

II.3. Historique de la Phytoépuration

La méthode du traitement des eaux usées grâce à la symbiose bactéries/végétaux est née dans l'ancienne Allemagne de l'Ouest dans les années 60. Depuis, elle n'a jamais cessé de s'améliorer et s'est développée au Danemark, en Autriche puis en Hollande, en Angleterre, aux USA et même en Australie. En France, l'une des premières implantations a été réalisée à pannessières, (Commune en France) dans le Jura, en 1986.

Cette technique s'oppose aux techniques classiques dites "à culture bactérienne libre" (exemple : stations d'épuration à boues activées) ou à "culture bactérienne fixée" (exemple : filtre bactérien), où l'oxygène nécessaire aux bactéries épuratrices est apporté mécaniquement au prix de coûts énergétiques importants.

II.4. Paramètres influençant la phytoépuration

a) 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.

b) La 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 aérobiose, et entre 10 et 65 °C en anaérobiose .

c) L'oxygène dissous

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)

d) La 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

nitifiantes 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).

e) La 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) (K : conductivité hydraulique) et avec une profondeur de nappe à plus de 1m sous la base du lit du bassin (Carleton et al.,2001).

f) 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).

g) 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 (Middle Brooks.,1990).

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 (Astebol et al.,2004). Le temps de séjour minimum recommandé est de 24 heures (Galvão.,2005).

II.5. Principe de l'épuration par macrophytes

La phytoépuration comprend l'épuration par les filières plantées de macrophytes, qui favorisent la biodiversité des espèces végétales plantées dans les bassins. Une station d'épuration par filtres plantés de macrophytes fonctionne comme un marais naturel. Dans ce cas, les eaux brutes (eaux grises et eaux vannes) passent à travers des bassins remplis d'un substrat minéral (sable, gravier, pouzzolane selon les cas) où sont plantés différents végétaux sub-aquatiques : *roseaux*, *massettes*, *joncs*, *iris*... (espèces locales de préférence car elles sont adaptées au climat). Ces plantes, et plus spécifiquement les roseaux (*Phragmites Communis* ou *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.

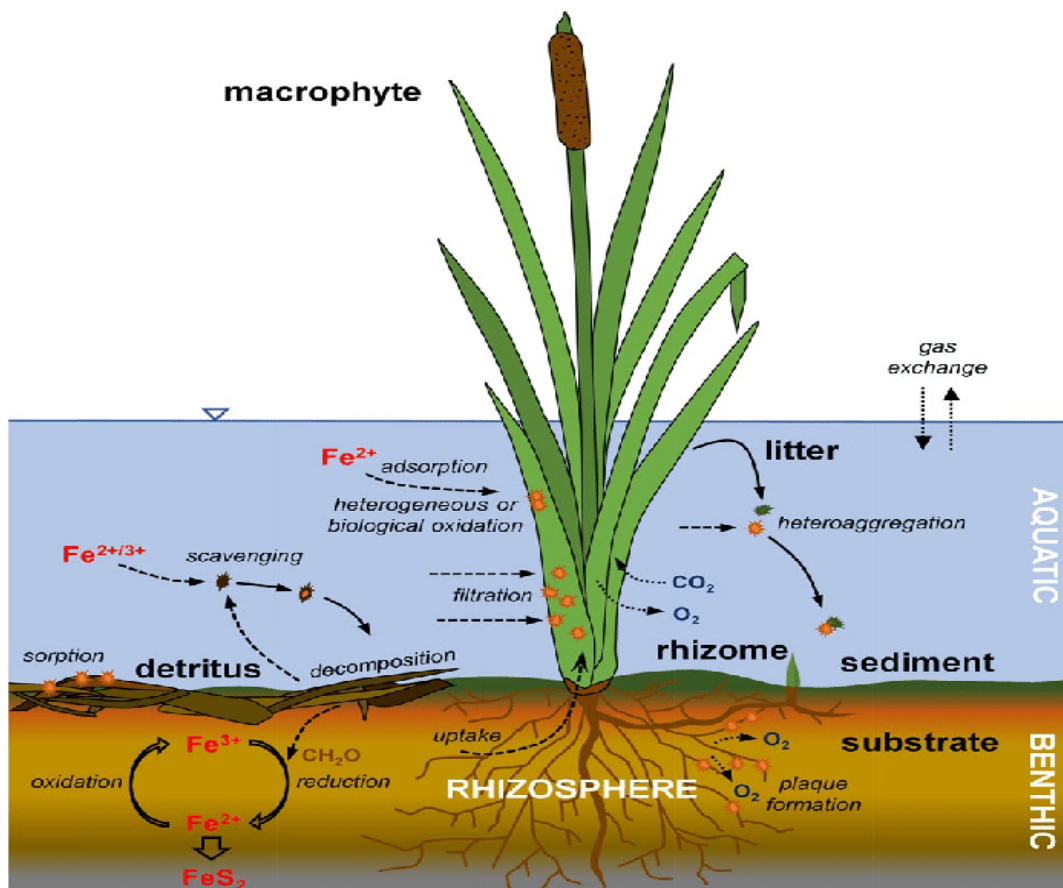


Figure N°01 : Principes de l'épuration dans un bassin à macrophytes (Rakotoarison, 2008)

Ces bactéries, ainsi que la macrofaune du sol (lombrics...), 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. (Carleton et al.,2001).

II.6. Le rôles majeurs des macrophytes

II.6.1. La partie Aérienne des plantes

- Évapotranspiration estivale.
- Stockage d'éléments nutritifs.
- Aspect esthétique positif du système.
- Influence du microclimat, isolation (hiver ou été).
- Atténuation de la lumière, réduction de la photosynthèse dans les eaux.
- Réduction de la vitesse du vent et du risque de remise en suspension des sédiments.

II.6.2. La partie immergée

- Absorption des éléments nutritifs.
- Production d'oxygène photosynthétique.
- Augmentation de surface de fixation du périphyton.
- Réduction de la vitesse du courant et augmentation du taux de sédimentation, réduction du risque de remise en suspension.

II.6.3. Racines et rhizomes dans les sédiments ou les dépôts de surface

- Absorption des éléments nutritifs.
- Stabilisation de la surface des sédiments, réduction de l'érosion.
- Augmentation de surface de contact pour les développements bactériens.
- Libération d'oxygène augmentant la nitrification et la dégradation bactérienne.
- Production d'antibiotiques, de phytometallophores et de phytochélatines (Sciences eaux et Territoires.,2014)
- Prévention du colmatage dans les systèmes à écoulements verticaux, effet de filtre des gros déchets.

II.6.4. Les plantes phytoépuration et leurs caractéristiques

II.6.4.1. Le papyrus (*Cyperus papyrus L.*)

Le papyrus (*Cyperus papyrus*) est une plante qui pousse notamment sur les rives du Nil et de son delta. Il est constitué d'une tige ligneuse de section triangulaire supportant des feuilles disposées en étoile à son sommet. Cette plante peut atteindre plusieurs mètres de haut. L'utilisation du Papyrus pour le traitement des métaux lourds dans les eaux usées a montré une capacité non négligeable dans la rétention des métaux spécialement pour le Cu, Zn et Fer.



Figure N°02 : *Le papyrus (Cyperus papyrus L.)* (Rajaonarivelo.,2012).

II.6.4.2. Le Roseau commun, (*Phragmites australis*)

Les phragmites communs sont les végétaux les plus fréquemment utilisés en épuration. Leur croissance rapide et leur aptitude à développer un système racinaire dense, facteur de démultiplication végétale, ne sont pas étrangères à cette préférence (Figure N°03). Les phragmites Australis (Figure N°03) sont des plantes très productives qui s'adapte facilement aux différentes conditions du milieu. Ce sont des rhizomes horizontaux et verticaux qui fournissent un support pour la croissance des bactéries. Avec les racines du *Phragmites Australis* ces rhizomes assurent une grande surface de contact entre sol-eau usées. Ces dernières produisent des exsudats pour les bactéries pathogènes. Ces techniques d'épuration dont le traitement par les plantes bénéficient d'une attention croissante.



Figure N°03 : *Le roseau commun « Phragmites Australis ».*(Rajaonarivelo, 2013).

II.6.4.3. La massette à larges feuilles (*Typha latifolia*)

Le typha est une plante vivace de 1-2 mètres, glabre, à tige robuste ; feuilles largement linéaires (6 à 18 mm.), planes, glaucescentes, dépassant la tige ; épi proches ou à peine espacés et qui colonise les marées, étangs, rivières dans presque toute la France, l'Europe, l'Asie, l'Afrique et l'Amérique boréale (Quezel et al., 1962–1963).

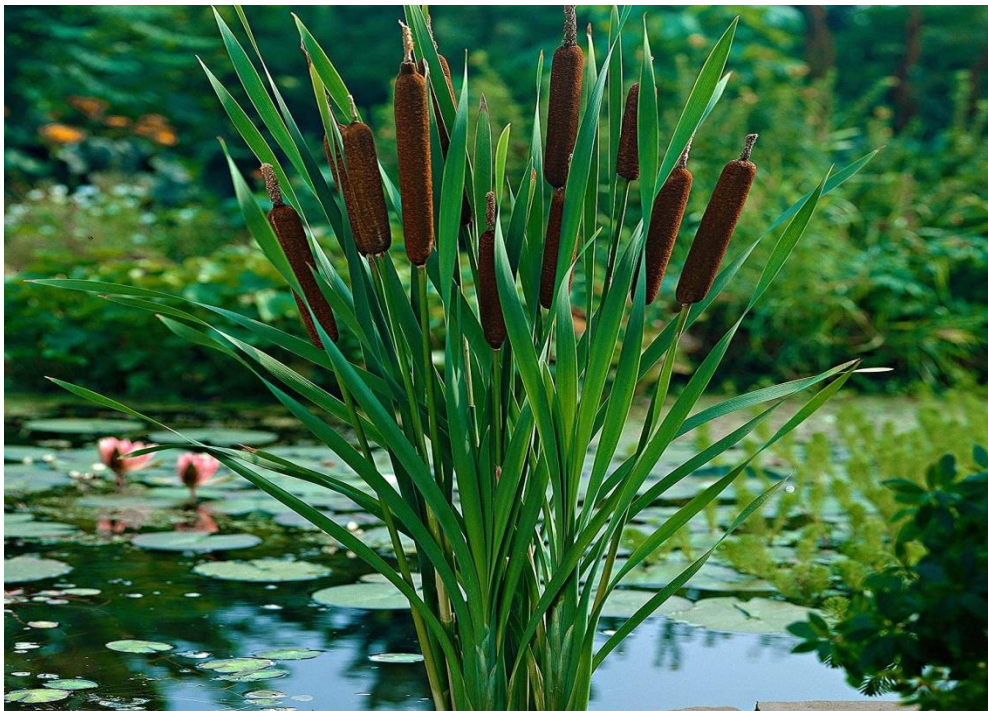


Figure N°04 : *La massette à larges feuilles (Typha latifolia)* (Tostain, 2011).

Le typha est une plante très résistante qui peut être utilisée pour les cas de pollution les plus désespérés. Elle est capable de dépolluer des eaux usées très polluées à la limite de l'asphyxie (lisiers, eaux de décharges). Elle est très performante dans les milieux à la limite de l'anoxie (peu d'oxygène). Elle biodégrade très bien les produits pétroliers, les composés chlorés, et résiste à tout : métaux lourds, sels, excès de DCO et DBO⁵.

Néanmoins, ils ne sont pas les seuls à pouvoir être utilisés dans le cadre d'une filtration à partir de végétaux. D'autres plantes de zone humide (divers roseaux, iris, scirpe...) sont également utilisées pour la phytoépuration de l'eau. De même on trouve aussi des espèces ligneuses comme les saules et les aulnes qui, de par leur constitution et leur développement, assurent une meilleure épuration de l'eau traitée, ménageant encore un peu plus les milieux récepteurs sensibles.

II.6.5. Le rôle du substrat

Les couches de matériaux posées dans les lits, filtrent automatiquement les matières en suspensions présentes dans l'eau usée à traiter.

Leur rendement dépend des caractéristiques hydrodynamiques, de la granulométrie et du type des matériaux utilisés. L'optimisation et le choix des matériaux de remplissage sont imposés par l'épaisseur et du type de filtre utilisé (FV ou FH). On doit avoir une filtration efficace tout en évitant le colmatage et la migration des particules entre les différentes couches ainsi les matériaux utilisés seront des granulats silicatés, roulés, lavés et calibrés.

Un filtre est constitué de terre, de sable, de gravier, et de matières organiques telles que du compost. Leur perméabilité affecte la circulation de l'eau ainsi, ils retiennent les sédiments et les déchets qu'elle transporte. Non seulement ils servent de support à la végétation, mais deviennent aussi le support d'un grand nombre d'organismes vivants, et le lieu de nombreuses transformations chimiques et biologiques (en particulier bactériennes) formant une source de carbone et d'énergie pour l'activité biologique. En fin ces substrats assurent le stockage de nombreux contaminants (Heinrich et al.,2007).

II.6.6. Oxygénation de la rhizosphère

Les petites quantités d'oxygène provenant des parties aériennes sont rejetées à l'apex des racelles des plantes, mais elles sont insuffisantes pour contribuer seules à la satisfaction des besoins d'oxygène de la biomasse bactérienne, responsable de la dégradation (Heinrich et al.,2007).

II.6.7. Ancrage des microorganismes

Le développement racinaire accroît la surface de fixation pour le développement des microorganismes et pour des réactions de précipitation. A cet accroissement de surface active, s'ajoute très certainement aussi un facteur encore stimulation de l'activité, voire de la diversité

et de la densité des micro-organismes, impliqués divers titres dans les processus épuratoires. Il s'agit d'un concept bien connu en agronomie et qui peut se résumer sous la forme triviale suivante "un sol planté est biologiquement plus riche et actif qu'un sol nu". Les tissus racinaires et leurs exsudats constituent vraisemblablement des niches plus accueillantes pour les micro-organismes que des substrats minéraux inertes (Heinrich et al.,2007).

II.7. Types de filtre planté

Les filtres plantés peuvent être soit à écoulement vertical, soit à écoulement horizontal. La combinaison en série des deux est largement répandue (systèmes hybrides), elle permet d'améliorer la qualité de l'épuration ainsi réalisée. Ils diffèrent par leur mode d'alimentation, par le sens de l'écoulement de l'eau et par les conditions aérobies de traitement.

II.7.1. Filtres plantés à écoulement vertical

Les principaux mécanismes d'épuration s'appuient sur la combinaison de plusieurs processus en conditions aérobies, qui se déroulent successivement sur deux étages de traitement ;

- Les filtres à écoulement vertical sont alimentés en surface, l'effluent percole verticalement à travers le substrat.
- La rétention physique des matières en suspension s'effectue en surface des filtres.
- Ce type de dispositif permet un stockage et une minéralisation des boues sur le premier filtre de traitement par stabilisation des boues.
- La dégradation biologique des matières dissoutes est réalisée par la biomasse bactérienne aérobie fixée sur le support non saturé. (Figure N°05)

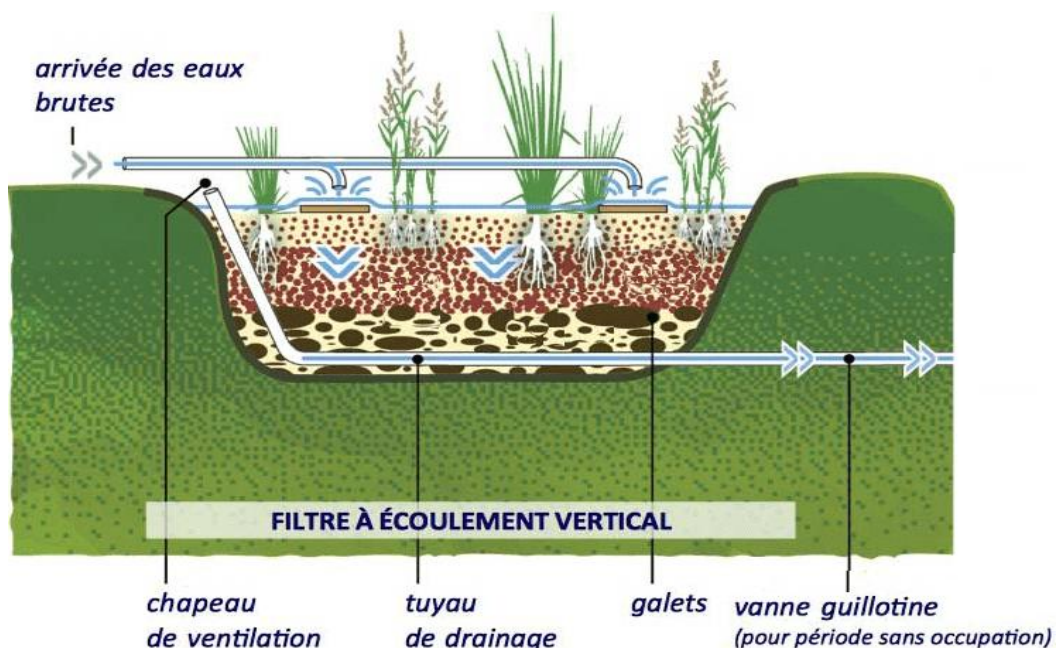


Figure N°05 : Schéma d'un filtre planté à écoulement verticale. (Bris.,1997).

Pour des questions de capacité d'oxygénation, les filtres du premier étage contribuent essentiellement à la dégradation de la fraction carbonée alors que ceux du deuxième étage terminent la dégradation de cette fraction et peuvent permettre une nitrification qui sera en fonction des conditions d'oxygénation, de la température et du pH (Poulet et al.,2004).

Ce procédé, qui nécessite 2 étages de 3 bassins parallèles, permet d'accepter des eaux usées brutes, de composter la pollution filtrée en surface, et d'obtenir des rendements d'épuration très intéressants. Il nécessite un entretien hebdomadaire, pour l'alternance des bassins, mais de faible technicité. Ce procédé est particulièrement intéressant pour les petites unités de traitement, de capacité comprise entre 100 et 1000 habitants raccordés (Carleton et al.,2001).

Un seul filtre est alimenté durant trois à quatre jours, puis un autre filtre en parallèle encore trois à quatre jours, pendant que les autres sont « au repos ». Les phases de repos doivent avoir une durée au moins égale à celle de la phase d'alimentation. Elles sont nécessaires pour favoriser l'aération et l'apport d'oxygène à l'intérieur du massif afin d'y maintenir des conditions aérobies et pour réguler la croissance de la biomasse fixée. Elles permettent également aux dépôts de matière organique accumulés à la surface du lit de se déshydrater et de se minéraliser (Carleton et al.,2001).

II.7.2. Filtres plantés à écoulement horizontal

Les filtres horizontaux ne sont pas alimentés par la surface, comme les filtres verticaux.

Les eaux usées décantées entrent, via un gabion d'alimentation, directement dans le massif filtrant. Il est donc nécessaire de débarrasser l'effluent, au préalable, des matières en suspension, soit par l'intermédiaire d'un décanteur placé en amont, soit par un premier étage de filtration verticale. Les matières dissoutes sont dégradées dans le massif de filtration par la biomasse bactérienne fixée sur le support. Le niveau d'eau dans un filtre horizontal est normalement constant.

L'aération est limitée par l'absence d'un mouvement de la ligne de saturation et se fait de manière très faible par une diffusion gazeuse. L'apport d'oxygène est faible par rapport à la demande totale.

La pénurie en oxygène, limite la dégradation de la pollution carbonée et azotée, oxydation du carbone organique et de l'ammonium, et par conséquent limite la croissance bactérienne hétérotrophe et autotrophe.(Figure N°06) (Poulet et al.,2004).

L'action des bactéries aérobies est ici réduite, contrairement à celle des bactéries anaérobies qui sont très actives. Or les mécanismes anaérobies participent à la transformation des formes réduites de l'azote NO_3^- (nitrates) en azote gazeux. L'étape de dénitrification peut donc avoir lieu, à condition qu'il y ait eu une première étape de nitrification. C'est pourquoi ces filtres sont souvent utilisés en aval des filtres plantés de roseaux à écoulement vertical (Carleton et al.,2001).

Il est utile de signaler que le filtre planté de roseaux à écoulement horizontal est plus sensible aux températures froides car il y a une lame d'eau permanente à la surface du filtre et cette eau peut geler.

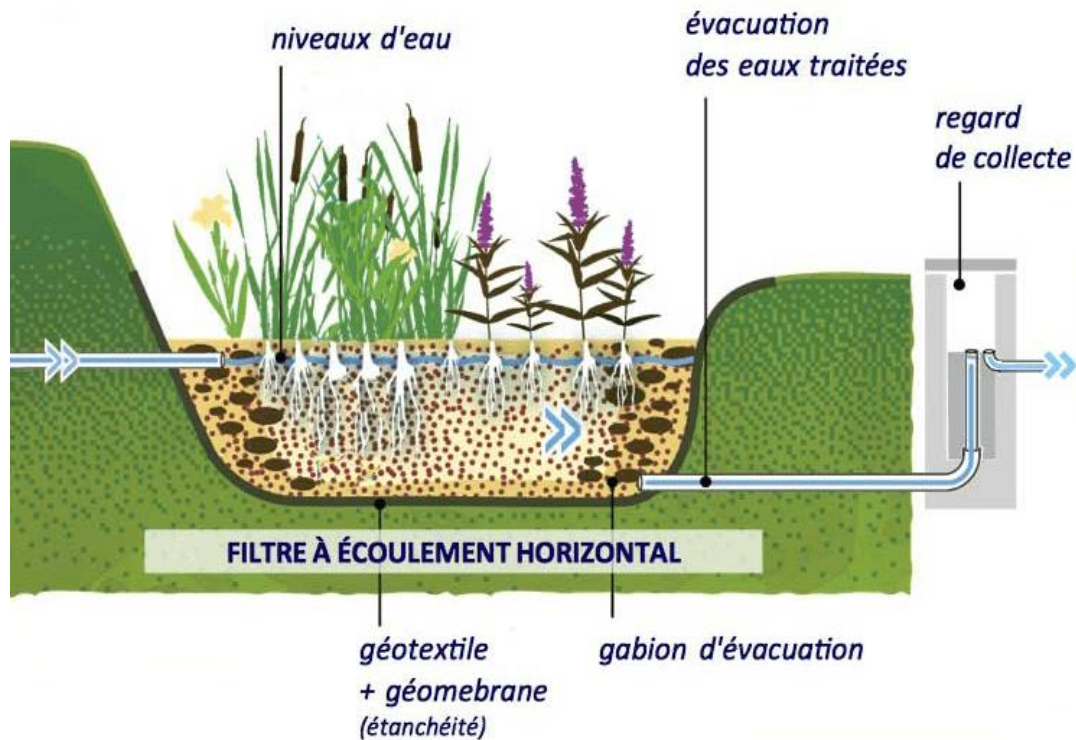


Figure N°06: Schéma d'un filtre planté à écoulement horizontale. (Bris.,1997).

II.1.1. Systèmes hybrides

Son intérêt réside dans la combinaison des deux sortes de filtres : bonne nitrification dans les filtres verticaux bien oxygénés (dégradation de la matière organique) suivie d'une dénitrification dans les filtres horizontaux par des bactéries dénitrifiantes (conditions d'anoxie nécessaires). Les rendements de la dénitrification ne sont pas très élevés car les bactéries ont besoin de matière organique pour se développer et dénitrifier correctement (Grison.,1999).

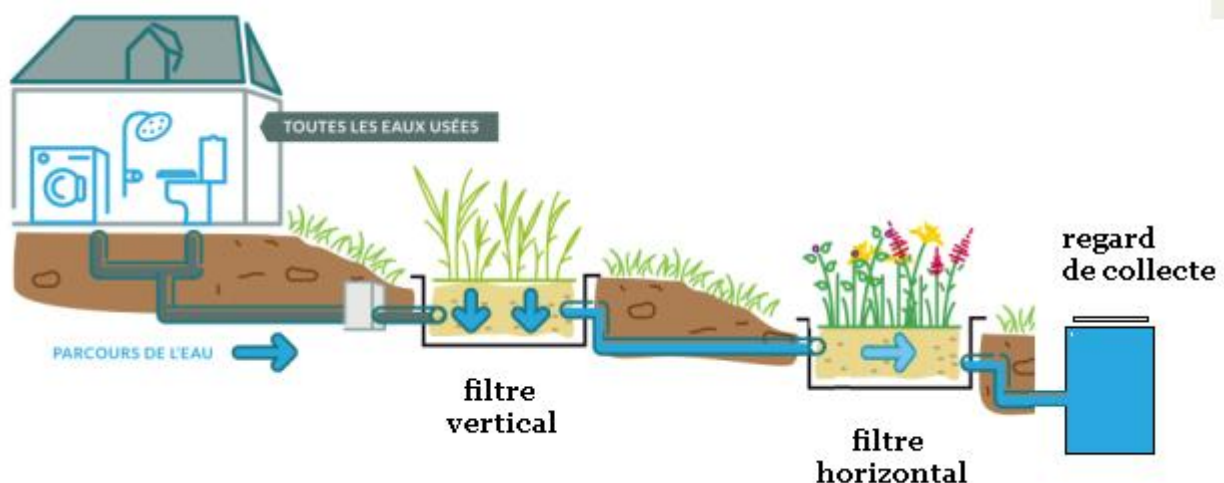


Figure N°07 : Coupe transversale schématique d'un filtre à écoulement hybride (Hendrik., 2008).

II.8. Les avantages et inconvénient de la phytoépuration

II.8.1. Les 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.,2002).
- ❖ Elle possède une excellente élimination de la pollution microbiologique.
- ❖ Contribue au développement et à la diversification de la flore locale, ainsi qu'à la protection de la faune et de la biodiversité (Yvan.,2002).
- ❖ Le traitement est 100% naturel, sans produit chimique.
- ❖ La tolérance aux variations de charges et de débits est très importante (Yvan.,2002).

II.8.2. Les 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 (Anne.,2001).
- ❖ Variation saisonnière de la qualité de l'eau en sortie.
- ❖ En cas de mauvais fonctionnement, risque d'odeurs pourrait apparaître.

II.9. La 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

II.9.1. 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 $10\text{m}^2/\text{EH}$ 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).

II.9.2. 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)

II.10. 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 Témachine 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 tracés 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)

Conclusion

Dans ce chapitre 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.



**CHAPITRE III
COMPARAISON ENTRE
L'EPURATION CLASSIQUE
ET LE LAGUNAGE**

III.1. Introduction

L'objectif d'épuration classique des eaux usées est l'obtention d'une eau épurée qui satisfait aux normes de rejets édictés par la législation, et pouvant par suite être évacuée sans danger du point de vue du risque pour la santé humaine et l'environnement. Selon la nature et l'importance de la pollution, différents procédés peuvent être mis en œuvre pour l'épuration des eaux résiduaires en fonction des caractéristiques de celles-ci et du degré d'épuration désiré. Au cours de ce chapitre nous nous sommes intéressés à l'étude des paramètres de la pollution des eaux usées évacuées par les agglomérations urbaines à l'exutoire, et les différents procédés d'épuration de ces effluents avant les rejets dans le milieu naturel.

III.2. L'épuration classique des eaux usées

L'épuration classique des eaux usées le plus approprié est celui qui fournit, avec certitude, des effluents de qualité chimique et microbiologique exigée pour un certain usage spécifique, à bas prix et des besoins d'opération et d'entretien minimaux. Les stations d'épuration classique des eaux résiduaires, indépendamment du type de traitement, réduisent la charge organique et les solides en suspension et enlèvent les constituants chimiques des eaux usées qui peuvent être toxiques aux récoltes ainsi que les constituants biologiques (microbes pathogènes) qui concernent la santé publique en général. Les différents degrés de traitements conventionnels sont :

III.2.1. Les procédés d'épuration classique des eaux usées

III.2.1.1. Le traitement préliminaire

Enlèvement des solides grossiers et d'autres grands fragments de l'eau usée brute (FAO.,2003). En tête d'une station d'épuration, ces procédés permettent de retenir les matières volumineuses grâce à des grilles (dégrillage), les sables (dessablage), les matières flottantes grossières (écumage) et les



Figure 08: Schéma D'une station d'épuration classique. (Racault,1996)

liquides moins denses que l'eau (désuilage). Les déchets solides peuvent être déchiquetés (dilacération) par des «pompes dilacératrices», cette opération facilitant leur dispersion (Desjardins.,1997).

III.2.1.1.1. Le dégrillage

Le dégrillage et le tamisage permettent de retirer de l'eau les déchets insolubles tels que les branches, les plastiques, serviettes hygiéniques, etc. En effet, ces déchets ne pouvant pas être éliminés par un traitement biologique ou physico-chimique, il faut donc les éliminer mécaniquement. Pour ce faire, l'eau usée passe à travers une ou plusieurs grilles dont les mailles sont de plus en plus serrées. Celles-ci sont en général équipées de systèmes automatiques de nettoyage pour éviter leur colmatage, et aussi pour éviter le dysfonctionnement de la pompe (dans les cas où il y aurait un système de pompage).

* Un dégrillage grossier : l'eau brute passe à travers une première grille qui permet l'élimination des matières de diamètre supérieur à 50mm.

* Un dégrillage fin : après le relevage de l'eau par quatre pompes (1250m³/ h pour chacune), il passe par deux grilles à câble composées de barreaux placés verticalement ou inclinés de 60 à 80° sur l'horizontale. L'espacement des barreaux est de 20mm, la vitesse moyenne de passage entre les barreaux est comprise entre 0,6 et 1 m/s (Legube.,1996)

III.2.1.1.2. Le dessablage

Le dessablage a pour but d'extraire les graviers, sables et autres particules minérales de diamètres supérieures à 0,2 mm contenus dans les eaux usées, de façon à éviter les dépôts dans les canaux et conduits, à protéger les pompes et autres appareils contre l'abrasion.

L'écoulement de l'eau à une vitesse réduite dans un bassin appelé « dessableur » entraîne leur dépôt au fond de l'ouvrage. Ces particules sont ensuite aspirées par une pompe. Les sables extraits peuvent être lavés avant d'être mis en décharge, afin de limiter le pourcentage de matières organiques, sa dégradation provoquant des odeurs et une instabilité mécanique du matériau (Degrément.,1972).

III.2.1.1.3. Le désuilage

C'est généralement le principe de la flottation qui est utilisé pour l'élimination des huiles. Son principe est basé sur l'injection de fines bulles d'air dans le bassin de désuilage, permettant de faire remonter rapidement les graisses en surface (les graisses sont hydrophobes). Leur élimination se fait ensuite par raclage de la surface. Il est important de limiter au maximum la quantité de graisse dans les ouvrages en aval pour éviter par exemple un encrassement des ouvrages, notamment des canalisations (Bonnin.,1977).

III.2.1.2. Le traitement primaire

Enlèvement des solides organiques et inorganiques sédimentables ainsi que les matériaux flottants (FAO.,2003). La décantabilité des matières dans un bassin est déterminée par l'indice de Mohlman.

Cet indice est déterminé chaque jour dans les stations d'épuration importantes afin de vérifier le bon fonctionnement du système. À la fin de ce traitement, la décantation de l'eau a permis de supprimer environ 60 % des matières en suspension, environ 30 % de la demande biologique en oxygène (DBO) et 30% de la demande chimique en oxygène (DCO). Cette part de DBO5 supprimée était induite

III.2.1.3. Le traitement secondaire (traitement biologique)

Enlèvement des matières organiques solubles et des matières en suspension des eaux usées traitées primaires (FAO.,2003). Les procédés d'épuration secondaire (ou biologique) comprennent des procédés biologiques, naturels ou artificiels, faisant intervenir des microorganismes aérobies pour décomposer les matières organiques dissoutes ou finement dispersées (Desjardins.,1997).

La dégradation peut se réaliser par voie aérobie (en présence d'oxygène) ou anaérobie (en l'absence d'oxygène).

a- la voie anaérobie

Si les réactions s'effectuent à l'abri de l'air, en milieu réducteur. Le carbone organique, après dégradation, se retrouve sous forme de CO₂, méthane et biomasse. Ce type de traitement appelé « digestion anaérobie » n'est utilisé que pour des effluents très concentrés en pollution carbonées, de type industriel (basserie, sucrerie, conserverie ...)

b- la voie aérobie

Si l'oxygène est associé aux réactions. Cette voie est celle qui s'instaure spontanément dans les eaux suffisamment aérées. Le carbone organique se retrouve sous forme de CO₂ et de biomasse (Degrémont.,1972). L'épuration biologique des eaux usées peut être mise en œuvre dans les micro-organismes se développent en suspension dans l'eau (boues activées), ou encore dans réacteurs à biomasse fixée dans lesquelles les micro-organismes se développent sur un support grossier ou sur garnissage plastique (lit bactériens), sur de disque (disques biologiques).

III.2.1.3.1. Les boues activées

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

principal sous-produit du cycle de traitement de l'eau. Donc les boues d'épuration urbaines résultent du traitement des eaux usées domestiques qui proviennent de l'activité des particuliers et éventuellement des rejets industriels dans les réseaux des collectivités après avoir suivi un prétraitement obligatoire (Céline pernin.,2003).

Une station de traitement par boues activées comprend dans tous les cas

- un bassin dit d'aération dans lequel l'eau à épurer est mise en contact avec la masse bactérienne épuratrice, - un clarificateur dans lequel s'effectue la séparation de l'eau épurée et de la culture bactérienne,
- un dispositif de recirculation assurant le retour vers le bassin d'aération de la boue biologique récupérée dans le clarificateur. Cela permet de maintenir dans ce bassin la quantité (ou concentration) de micro-organismes nécessaire pour assurer le niveau d'épuration recherché,
- un dispositif d'extraction et d'évacuation des boues en excès, c'est-à-dire du surplus De culture bactérienne synthétisée en permanence à partir du substrat,
- un dispositif de fourniture d'oxygène à la masse bactérienne présente dans le bassin d'aération,
- un dispositif de brassage de ce même bassin, afin d'assurer au mieux le contact entre les cellules bactériennes et la nourriture (Degrément.,1972).

III.2.1.3.2. Lit bactérien

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. Une aération est pratiquée soit par tirage naturel soit par ventilation forcée. Il s'agit d'apporter l'oxygène nécessaire au maintien des bactéries aérobies en bon état de fonctionnement. Les matières polluantes contenues dans l'eau et l'oxygène de l'air diffusent, à contre-courant, à travers le film biologique jusqu'aux micro-organismes assimilateurs. Le film biologique comporte des bactéries aérobies à la surface et des bactéries anaérobies près du fond. Les sous-produits et le gaz carbonique produits par l'épuration s'évacuent dans les fluides liquides et gazeux. Le rendement maximum de cette technique est de 80 % d'élimination de la DBO5 (Rodart et al.,1989).

III.3. Le lagunage

Parmi les divers procédés d'épuration des eaux usées, dont l'application dépend des caractéristiques des eaux à traiter et du degré de dépollution souhaité, figure le lagunage naturel. Moyen rustique d'épuration des eaux usées, il se distingue des autres techniques de traitement réputées intensives par de nombreux avantages. Ce procédé écologique, simple et peu onéreux se base sur les phénomènes responsables de l'autoépuration des cours d'eau.

a)- Définition

Le lagunage est une technique biologique d'épuration des eaux usées, où le traitement est assuré par une combinaison de procédés aérobies et anaérobies, impliquant un large éventail de microorganismes (essentiellement des algues et des bactéries). Les mécanismes épuratoires et les microorganismes qui y participent sont, fondamentalement, les mêmes que ceux responsables du phénomène d'autoépuration des lacs et des rivières (Pearson.,2005).

b)- Principe de fonctionnement

Le lagunage se présente comme une succession de bassins (minimum 2 et généralement 3) peu profonds (le plus souvent rectangulaires) dits lagunes. La surface et la profondeur de ces lagunes influencent le type de traitement (aérobie ou anaérobie) et confèrent un rôle particulier à chacune d'entre-elles. L'épuration par lagunage consiste à faire passer des effluents d'eau usée par écoulement gravitaire de lagune en lagune où la pollution est dégradée par (Valiron.,1983) :

- ❖ L'activité bactérienne.
- ❖ L'activité photosynthétique et l'assimilation des substances minérales.
- ❖ Le pouvoir germicide de la lumière et de certaines algues.

Les matières en suspension de l'eau brute décantent dans le bassin de tête. Les bactéries assimilent la pollution dissoute, et l'oxygène nécessaire à cette dépollution, est assuré par l'action chlorophyllienne de végétaux qui participent aussi à la synthèse directe de la matière organique :

- ❖ Les microphytes ou algues microscopiques ; ce sont essentiellement des algues vertes ou bleues difficilement séparables
- ❖ Les macrophytes ou végétaux macroscopiques, qui comprennent des formes libres (ex. lentilles d'eau) ou fixées (ex. roseaux). Les jacinthes d'eau peuvent s'enraciner ou non.

Les végétaux supérieurs jouent un rôle de support et doivent normalement permettre d'augmenter la quantité de bactéries et d'algues épuratrices (Degremont.,1989).

Les macrophytes sont consommés par le zooplancton, et les macrophytes filtrent l'eau en sortie avant rejet. L'ensemble de ces phénomènes apparaît dans plusieurs bassins en séries, ce qui autorise l'étagement des phénomènes épuratoires.

Le processus épuratoire qui s'établit dans une lagune est particulièrement intéressant, car c'est un phénomène vivant, un cycle naturel qui se déroule continuellement.

III.3.1. Le lagunage naturel

Ce sont des bassins artificiels et imperméabilisés, de faible profondeur pouvant recevoir des effluents bruts ou prétraités et où la recirculation des boues biologiques décantées n'est pas réalisée, et la concentration de la biomasse épuratrice reste faible. Alimentées d'effluents à traiter, les lagunes naturelles sont nommées étangs de stabilisation (Koller.,2004), que l'on classe en fonction des filières de développement des bactéries en trois catégories : anaérobies, aérobies ou facultatifs (mixtes).

Différents assemblages de ces bassins sont possibles en fonction des conditions locales, des exigences sur la qualité de l'effluent final, du débit à traiter, ...

A titre d'exemple, si l'on souhaite un degré de réduction plus élevé des organismes pathogènes, on dispose les bassins en série comme suit : étang anaérobie, facultatif puis anaérobie (Chaib.,2004).

Le lagunage naturel peut être utilisé, en traitement complet des effluents ou en traitement tertiaire, pour affiner la qualité de l'eau traitée par une boue activée (ex. la désinfection) (Degrémont.,1978).

a). Les bassins anaérobies

Les bassins anaérobies sont caractérisés par un manque d'oxygène dissous causé par une forte DBO5 (100-400 g/m3/jour), et les solides en suspension s'y déposent facilement ; ils forment sur le fond une couche où les bactéries anaérobies décomposent la matière organique. Un des résultats est la production de gaz : l'hydrogène sulfuré (H₂S) et le méthane (CH₄) qui s'échappent vers la surface sous forme de bulles.

Typiquement, ces lagunes ont une profondeur de 2 à 5 m et le temps de séjour de l'effluent y est de 3 à 5 jours. Ils reçoivent des effluents bruts et mènent à des réductions de la DBO5 de 40 à 60 % et des solides en suspension de 50 à 70 %.

En générale, on n'y trouve pas de micro-algues à cause des conditions défavorables à leur croissance (Sevrin-reyssac et al.,1995).

b). Les Bassins facultatifs

D'une profondeur de 1 à 2 m et un temps de séjour de 4 à 6 jours (Sevrin-reyssac et al.,1995), ces étangs fonctionnent dans des conditions telle que la partie supérieure entretient un milieu aérobie, riche en algues et en micro-organismes aérobies, alors que le fond, couvert de sédiments organiques, est le siège de fermentation anaérobie ; entre ces deux zones règne un milieu de transition favorable aux bactéries facultatives (Beaudry.,1984).

Les fermentations benthiques donnent lieu à un dégagement de méthane (CH_4), de dioxyde de carbone (CO_2), d'hydrogène sulfuré (H_2S) et d'ammoniac, ainsi que de composés organiques de faible masse moléculaire.

Ce produit alimente la flore des zones supérieures et les composés minéraux dégagés entretiennent les algues ; une certaine fraction de ces algues meurent et se sédimentent, venant s'ajouter au lit de boues (Beaudry.,1984).

c). Le bassin de maturation

Les bassins des maturations ou des aérobies sont peu profonds (0,8 à 1,2 m) où la lumière peut pénétrer et favorisant le développement d'algues vertes. Par leur action photosynthétique, les algues produisent de l'oxygène qui permet le développement de bactéries épuratrices aérobies (Degrémont, 1978).

Le temps de séjour dans ces étangs est beaucoup plus long, de 12 à 18 jours ou plus, et permet un traitement d'effluent déjà partiellement épuré (Sevrin-reyssac et al.,1995). Ces étangs sont caractérisés par (ANRH.,1996) :

- ❖ Charge (Kg DBO5/ha/jour) : 111 à 112.
- ❖ Rendement (% de DBO5) : 80 à 95 %.
- ❖ Concentration en algues (mg/l) : 100.

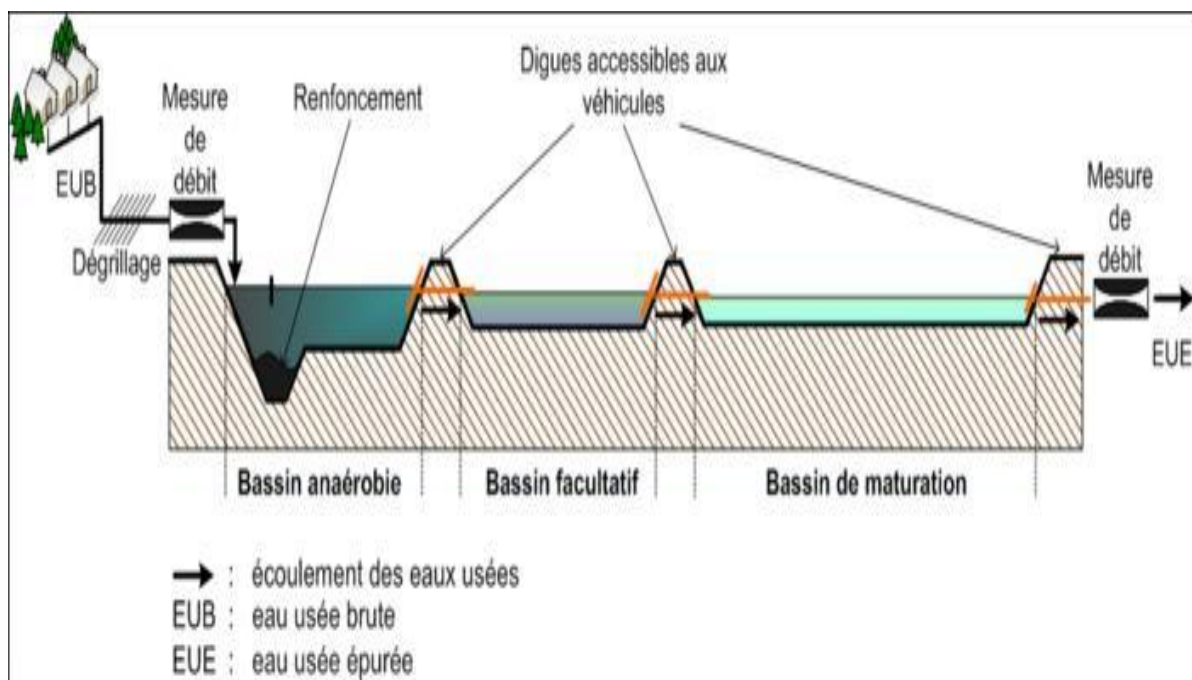


Figure 09: Schéma d'épuration des eaux usées par lagunage naturel (www.lagunage.eu)

III.3.2. Le lagunage aéré

Ce sont de vastes bassins constituant un dispositif très proche du procédé à boues activées à faible charge. On y effectue une épuration biologique bactérienne comme celle qui se pratique naturellement dans les étangs, en apportant de l'extérieur par insufflation d'air ou oxygénation au moyen d'aérateurs de surface, l'oxygène nécessaire au maintien des conditions aérobies des bactéries épuratrices.

Bien que théoriquement elle ne s'impose pas, une recirculation de l'eau traitée et parfois des boues biologiques en tête de lagune est souvent pratiquée. Elle permet d'améliorer le mélange complet et d'assurer une meilleure répartition de la biomasse.

Il est rare, en raison de la concentration relativement élevée en matières en suspension, que l'on puisse rejeter directement l'effluent traité à l'exutoire sans décantation finale (Koller.,2004).

III. 3.3. Influence des conditions climatiques sur les performances du lagunage

Le microclimat est le climat local auquel sont soumises les lagunes, il résulte de l'action de plusieurs facteurs qui jouent un rôle important dans l'implantation du lagunage naturel , ce sont principalement :

a). La durée du jour et l'intensité de l'ensoleillement

La durée du jour conditionne, dans une certaine mesure, la vitesse de multiplication du phytoplancton. L'intensité de l'ensoleillement a une influence sur l'activité photosynthétique des végétaux. Si le ciel reste couvert pendant plusieurs jours, surtout en été alors que le phytoplancton est abondant, la production de l'oxygène due à la photosynthèse pendant la journée devient moins importante, ce qui risque d'entraîner une désoxygénation passagère (Sevrin-reyssac et al.,1995).

b). La température

Les écarts de température exercent une influence sur le bon fonctionnement des systèmes de lagunage naturel. La croissance des algues est favorisée par une température élevée. Lorsqu'ils sont bien ensoleillés et bien oxygénés, les bassins aérobies ne dégagent pas d'odeur. Un ciel nuageux, plusieurs jours de suite, affaiblit le phénomène de photosynthèse créant ainsi des zones anaérobies dont les produits de fermentation conduisent à de mauvaises odeurs. La température intervient aussi dans le calcul du dimensionnement des installations ; les moyennes mensuelles des cinq dernières années doivent alors être connues (Anrh.,1996).

c). Le régime des vents dominants dans la région et leur orientation

Les vents dominants sont ceux dont la direction est la plus fréquente. Ce régime des vents étant connu pour une région donnée, nous permet de fixer l'implantation du système de telle sorte à éviter

le rabattement sur les habitations des mauvaises odeurs susceptibles de provenir de l'installation, et de ne pas avoir des effets néfastes sur l'ouvrage (dégradation des digues par batillage) (Anrh.,1996).

d). L'évaporation

L'évaporation est un facteur très important. Elle est très intense en période estivale (10 à 15 mm/j). Conjugée à une infiltration importante, elle peut être néfaste et doit donc être prise en considération lors des calculs de dimensionnement des bassins (Anrh.,1996).

e). La pluviométrie

Elle devrait également être connue pour le calcul de la hauteur des digues, afin d'éviter tout risque éventuel d'inondation (Anrh.,1996).

III.4. L'avantages et inconvénients du lagunage naturel

III.4.1. L'avantages

Le lagunage naturel présente de nombreux avantages par rapport aux procédés classiques :

- ❖ Excellente élimination de la pollution microbiologique.
- ❖ Faibles coûts d'investissement et de fonctionnement.
- ❖ Raccordement électrique inutile.
- ❖ Très bonne intégration paysagère.
- ❖ Valorisation aquacole et agricole de la biomasse planctonique produite et des effluents épurés.
- ❖ Boues peu fermentescibles.
- ❖ Bonne élimination de l'azote (70 %) et du phosphore (60 %).

III.4.2. L'inconvénients

A l'inverse, le lagunage naturel présente les inconvénients suivants.

- ❖ Variation saisonnière de la qualité de l'eau en sortie.
- ❖ En cas de mauvais fonctionnement, risque d'odeurs, de moustiques, de rongeurs.
- ❖ Emprise au sol importante.
- ❖ Difficultés d'extraction des boues.
- ❖ Pas de réglage possible en exploitation.
- ❖ Sensibilité aux effluents septiques et concentrés.

Conclusion

Le lagunage est fortement dépendant des conditions climatiques (essentiellement de la température), et la qualité des rejets peut donc varier selon les saisons. L'emprise au sol est relativement importante. Les coûts d'investissement sont non seulement dépendants du prix du terrain, mais aussi de la nature

du sol. Sur un sol perméable, il sera indispensable d'ajouter un revêtement imperméable, et dans ce cas, l'investissement peut s'avérer onéreux, voire difficilement abordable.

Malgré ces défauts, le lagunage reste une technique efficace (également pour l'azote, le phosphore et germes pathogènes) bon marché, ne nécessitant pas de construction en dur (génie civil simple) et s'intégrant parfaitement au paysage. De plus, aucun apport d'énergie n'est requis si le terrain est en pente.

Au sein du lagunage naturel et par les processus biologiques qu'ils créent, les organismes jouent un rôle distinct mais complémentaire dans l'épuration des eaux usées en formant un parfait équilibre biologique naturel.



CHAPITRE IV
LA PHYTOREMEDIATION DU
SOL ET LES TECHNIQUES
DE DEPOLLUTION DES
SOLS

IV. Introduction

Le sol recueille de nombreux produits issus de l'activité naturelle de la Terre (volcanisme) et de l'activité humaine (industrielle, agricole, domestique...). Parmi tous ces produits, certains métaux lourds sont indispensables à la vie du sol (cuivre, zinc), mais ce n'est pas le cas pour d'autres (plomb, mercure, cadmium). Tous sont toxiques à des doses plus ou moins élevées (Lamy et al., 2006).

IV. La pollution

IV.2. Définition de la pollution

D'après (Ramade.,1989 et Gelin.,1998) la pollution est une modification défavorable du milieu naturel. (Mazoyer.,2002) en modifie les composantes physiques, chimiques ou biologiques. (Ramade.,1989 et Gelin.,1998) qui apparait en totalité ou en partie comme un sous-produit de l'action humaine. Ces modifications peuvent affecter l'homme directement ou au travers des ressources agricoles, en eau et autres produits biologiques. La pollution comprend des notions à la fois qualitatives et quantitatives. Ainsi à côté des polluants artificiellement par les activités humaines (Viala.,1998).

IV.3. Sources de la pollution

Selon (Viala.,1998) Les principales sources de pollution actuellement sont:

- a)- la production de l'énergie** ; elle fait appel aux combustibles fossiles, l'énergie nucléaire et la pollution thermique.
- b)- les activités de l'industrie chimique** ; l'industrie chimique peut rejeter, notamment dans l'air et dans les eaux, des quantités plus ou moins importantes de produits les plus divers.
- c)- les activités agricoles** ; les engrais et les pesticides sont massivement utilisés à l'heure actuelle en vue d'augmenter et intensifier les rendements agricoles.

IV.4. Pollution des sols

D'après (Bliefert et Perraud.,1997) les pollutions du sol peuvent apparaitre de différentes manières. Une grande partie des composés, qui ont de l'influence sur les sols et sur les organismes qu'ils contiennent.

IV.5. Source de la pollution des sols

D'après (Mazoyer.,2002) les causes de la pollution des sols liées à l'activité agricole proviennent essentiellement de l'existence, dans les produits utilisées pour fertiliser ou traiter les cultures, de différents composés toxiques. Ces derniers sont souvent présents en très petites quantité, mais leur

accumulation lente peut entraîner la contamination de certains sols cultivés, ces substances sont en effet très peu mobiles dans le sol et sont peu absorbées par les plantes.

Selon (Stengel et Gelin.,1998) Ces produits toxiques parviennent-ils aux sols par différentes voies

IV.5.1. Par le fond pédo-géochimique naturel

Les sols comportent naturellement des éléments traces métalliques, héritage de la roche mère. Ces éléments sont en partie absorbés par les racines des plantes puis libérés plus tard dans le sol.

IV.5.2. Par voie atmosphériques

En plus de ses composants gazeux, l'atmosphère contient des particules, les aérosols, qui proviennent de sources variées, naturelles ou liées aux activités humaines.

IV.5.3. Par épandage des déchets

La matière organique, les éléments fertilisants et les boues d'épuration contiennent souvent des substances toxiques, en particulier des métaux à l'état de trace qu'il est actuellement impossible d'extraire dans des conditions techniquement et économiquement acceptable.

IV.5.4. Avec les apports de phosphates

Une étude réalisée sur des parcelles témoins, existant depuis 1929 sur le domaine de l'INRA à Versailles, a confirmé que la contribution des engrais phosphatés représente une part importante de la pollution totale en cadmium des sols qui ne reçoivent pas d'autres épandages.

IV.5.5. Au sein de sites pollués

Les sites pollués sont des sites dont le sol ou le sous-sol ou les eaux d'irrigations ont été pollués localement par d'anciens dépôts de déchets ou par l'infiltration de substances polluantes. Les sols comportent naturellement des éléments-traces métalliques, héritage de la roche mère et des retombées atmosphériques d'origine naturelles.

IV.6. Généralités sur les sols

IV.7. Définition et caractéristiques générales d'un sol

Le sol peut être défini comme la couche supérieure de la croûte terrestre composée de particules minérales, de matière organique, d'eau, d'air et d'organismes vivants. Le sol est donc un système hétérogène et complexe composé d'une phase solide représentée par les particules du sol, d'une phase liquide représentée par l'eau du sol (qui peut être enrichie en de nombreux composés et particules) et d'une phase gazeuse constituée par l'air emprisonné dans le sol. Ceci permet de

déterminer un domaine non saturé et un domaine saturé. Dans la partie non saturée, les pores du sol ne sont que partiellement remplis par l'eau, et les gaz y prédominent.

Le sol contient deux fractions intervenant principalement dans la sorption des polluants organiques, à savoir les fractions organiques et minérales :

- ❖ La fraction minérale est principalement constituée de minéraux primaires (quartz, feldspaths, micas, etc.) et de minéraux secondaires, les oxydes métalliques ou les argiles. Généralement, cette fraction n'intervient pas ou peu dans la sorption des substances, sauf quand la teneur en carbone organique du sol est faible, c'est-à-dire lorsque la fraction du carbone est inférieure à 0,001 (Gabet.,2004).

- ❖ La fraction organique : elle est formée en grande partie de cellulose et d'hémicellulose, de lignine et de tanins en plus faibles pourcentages, venant du matériel décomposé. Cette matière organique (MO) contient également de petites quantités de protéines et des fragments d'hydrates de carbone, des composés aminés, phénoliques ou aromatiques issus de l'activité biologique. Cette fraction intervient fortement dans la sorption des composés organiques tels que les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP).

IV.7.1. Propriétés physiques du sol

❖ Structure

La structure d'un sol est le mode d'assemblage, à un moment donné, de ses constituants solides. La stabilité structurale dépend de la teneur en argile et de la matière organique des sols. Le complexe argilo-humique joue un rôle structural plus ou moins important selon les teneurs en eau du sol et il varie en fonction du type d'argile. La matière organique augmente la stabilité des agrégats. Une mauvaise structure peut donc empêcher l'écoulement des eaux dans le sol et limiter des échanges gazeux entre le sol et l'atmosphère. Ce cas est généralement observé pour les sols pollués aux HAP, du fait de la non miscibilité eau-huile.

Une bonne structure en revanche assure une grande facilité de circulation d'eau et donc laisse s'écouler l'excès, assure une bonne aération des racines, une bonne germination, une pénétration profonde des racines et une bonne exploration par les racines des ressources nutritives du sol.

❖ Texture

La texture du sol est l'une des bases des propriétés du sol. C'est la propriété du sol qui traduit de manière globale la composition granulométrique de la terre fine : sable (< 2 à 0,05 mm), limon (0,05 à 0,002 mm) et argile (< 0,002 mm) (Raju et al.,2017). La texture constitue un caractère fondamental du sol car elle influe sur plusieurs paramètres à savoir :

- **La perméabilité du sol à l'eau et à l'air**

Le critère retenu pour mesurer la perméabilité est la vitesse de percolation de l'eau exprimée en cm³/heures. Le taux élevé de la matière organique n'implique pas forcément une bonne perméabilité. Cependant, le degré de décomposition de la matière organique a une influence sur la perméabilité.

- **La rétention d'eau**

Sous forme de vapeur ou de liquide, l'eau occupe environ un quart du volume d'un sol. Quand ce dernier est saturé, l'eau qui percole à travers une tranche de sol le fait sous l'influence de la gravité.

IV.7.2. Propriétés chimiques du sol







❖ Potentiel d'hydrogène (pH)

Le potentiel d'hydrogène (pH) est le logarithme décimal de la concentration d'une solution en ion H⁺ ($\text{pH} = -\log_{10} [\text{H}^+]$). Il permet d'approfondir les modalités d'interactions entre les ions et les surfaces absorbantes du sol. Des appréciations sont attribuées aux différentes valeurs de pH du sol (tableau 1). Le pH est l'expression la plus couramment utilisée pour donner une idée très générale des conditions dans lesquelles le sol fonctionne. La plupart des plantes s'accommodent d'un pH autour de la neutralité (de 6 à 7,5). Certaines exigent cependant une terre acide (plantes acidophiles) ou au contraire calcaire.

Le degré d'acidité ou d'alcalinité d'un sol est une propriété très importante qui affecte de nombreuses autres propriétés physico-chimiques et biologiques du sol. Les problèmes liés aux sols acides ou à l'acidification des sols agricoles peuvent être surmontés en augmentant la saturation en base et le pH avec des amendements du sol. (Shirdam ; al 2008).

Les sols pollués par les hydrocarbures tendent vers l'alcalinité. En fait, un sol pollué par les hydrocarbures possède généralement un pH plus élevé qu'un sol sain (Shirdam ; al, 2008 ; Xiao ; al 2015) ; et le pH d'un sol augmente généralement en fonction du degré de pollution en HAP (Njoku et al.,2009).

Tableau N°07. Statut acido-basique des sols ; adapté de Lano (2019).

	Valeur du pH	Statut acido-basique
	$\text{pH} \leq 5,5$	Sol très acide
	$5,5 < \text{pH} \leq 6,0$	Sol acide
	$6,0 < \text{pH} \leq 6,5$	Sol peu acide
	$6,5 < \text{pH} \leq 7,0$	Sol neutre
	$7,0 < \text{pH} \leq 7,5$	Sol peu alcalin (peu basique)
	$\text{pH} > 7,5$	Sol alcalin (basique)

IV.7.3. Propriétés biologiques du sol

La compréhension des propriétés biologiques du sol est importante pour la prévention et la lutte contre les ravageurs et les maladies des cultures, mais également pour la gestion des sols. Le sol abrite un réseau complexe d'organismes (nématodes, arthropodes, champignons, bactéries, protozoaires, etc.) qui peuvent influencer son évolution et ses propriétés physicochimiques spécifiques. Par exemple, l'activité des vers de terre augmente le taux d'infiltration, lorsque l'activité microbienne diminue la matière organique du sol suite à la minéralisation.

Les propriétés biologiques du sol sont également liées à d'autres propriétés physiques et chimiques du sol. L'aération, la matière organique du sol ou le pH influent sur l'activité de nombreux micro-organismes qui exercent à leur tour des activités pertinentes dans le cycle du carbone et des éléments nutritifs. Ainsi, les changements dans les propriétés des sols dus à leur manipulation ou leur dégradation par les pollutions diverses peuvent affecter de manière significative leurs propriétés biologiques (Delgado et Gómez.,2016). Par exemple, l'activité microbienne du sol peut être considérablement augmentée par l'amélioration du drainage, le chaulage ou les amendements organiques. C'est pourquoi certaines propriétés biologiques du sol (tableau 3) peuvent être utilisées comme indicateurs indirects d'une gestion appropriée du sol et d'une bonne qualité des sols, telles que le taux de respiration du sol ou certaines activités enzymatiques qui peuvent être dérivées d'organismes vivants dans le sol.

Tableau N°08. Quelques propriétés biologiques du sol (Delgado et Gómez.,2016).

Propriétés	Méthodes de détermination
Taux de respiration	Évolution du CO ₂ dans des conditions standard de laboratoire ou sur le terrain.
Potentiel de minéralisation N ou C	Augmentation de la teneur en N ou C minérale sous conditions standard en laboratoire.
Vers de terre	Densité des vers de terre.
Biomasse bactérienne	Biomasse bactérienne totale pour une masse de sol donnée.
Diversité bactérienne	Elle peut être déterminé par des groupes fonctionnels ou en décrivant la diversité génétique.
Présence des pathogènes	Par différentes techniques de pathologie, par des cultures au profilage d'ADN.

La matière organique du sol est un facteur clé qui influe sur l'activité biologique des sols. C'est la source de carbone de nombreux organismes, y compris le microbiote du sol. Non seulement la quantité, mais aussi le type de composés organiques présents dans le sol détermine son activité biologique. En effet, l'activité microbienne est grandement augmentée en incorporant des résidus organiques frais (tels que du fumier vert ou des résidus de culture), qui peuvent être facilement minéralisés par les microbes. D'autre part, les formes stables de matière organique (composés humiques et fulviques) ne sont pas une source de carbone très appropriée pour le microbiote du sol.

La rhizosphère est le volume de sol altéré par le système racinaire et la partie du profil du sol où se concentrent les sources de carbone appropriées pour de nombreux microorganismes. Les composés organiques exsudés par les racines des plantes (y compris les anions organiques de faible poids moléculaire) modifient les propriétés chimiques du sol et augmentent considérablement l'activité biologique par rapport au sol nu. La rhizosphère est un espace d'interaction intense entre les racines des plantes et les microorganismes du sol. Ces derniers peuvent donc avoir une incidence importante sur le développement des plantes en produisant des régulateurs de croissance, en diminuant l'incidence des maladies des plantes et en augmentant la disponibilité des éléments nutritifs pour les plantes.

IV.8. La depollution du sol

Nos écosystèmes sont exposés à de nombreuses sources de pollution. Les sols et les eaux, près des sites industriels, subissent une accumulation de métaux lourds, de composés organiques, ainsi que parfois de composés radioactifs. Nous n'aborderons pas les conséquences de ces pollutions sur les écosystèmes mais plutôt comment des sols peuvent être dépollués.

Cette accumulation peut être très importante aux abords des sites industriels et dans ce cas, la seule solution est l'excavation et le retraitement. C'est le concept de phytoremediation ou dépollution des sols par des plantes (Dabouineau et al.,2005).

IV.9. La phytoremédiation

La phytoremédiation (grec phyto : plante, latin remedium : corriger un méfait) est définie comme l'utilisation des plantes pour éliminer ou transformer les polluants en composés moins toxiques. Bien que les plantes soient utilisées depuis longtemps pour dépolluer les sols, d'importantes découvertes scientifiques réalisées au cours de ces dix dernières années ont contribué à améliorer le processus et à étendre son champ d'application (Jemal et Ghorbal.,2002).

Plusieurs études ont identifié des espèces végétales hyper accumulatrices, principalement des halophytes très prometteuses pour le dessalement des sols salins. La comparaison de la salure des sols en début et à la fin de l'expérimentation a également montré l'aptitude des halophytes à extraire une quantité appréciable de sel (Abdelly.,2006).

Un métal est dit hyperaccumulé lorsque sa masse dans les différents tissus de la plante est supérieure à 0,1 % de la masse sèche de la plante, soit 1 g / kg (Baker et Brooks.,1989). Il existe cependant des exceptions à cette définition (Huang et al.,1998).

IV.10. Les différentes techniques de phytoremédiation

Différents mécanismes (figure N°10) sont utilisés par les plantes afin de faciliter la décontamination des sols pollués (Macek et al.,2000). Chacun de ces mécanismes ont des effets sur le volume, la mobilité ou la toxicité des contaminants. Le (tableau N° 09) associe les mécanismes de phytoremédiation à divers polluants.

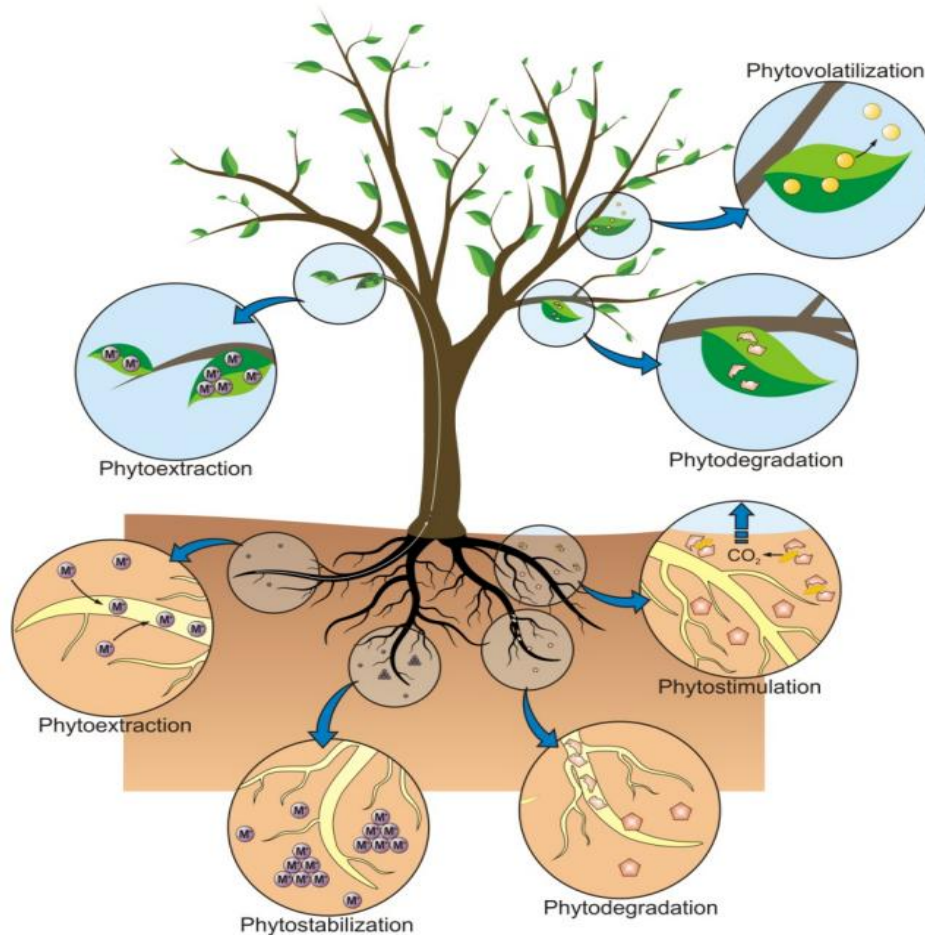


Figure N°10: Les différents mécanismes de la phytoremédiation des sols (Alchimia, 2016).

IV.10.1. La phytoextraction

Elle utilise des plantes capables de prélever les éléments traces toxiques et de les accumuler dans les parties aériennes qui seront ensuite récoltées puis incinérées (Jemal et Ghorbal.,2002).

Les espèces végétales concernées absorbent, concentrent et stockent les métaux toxiques du sol contaminé dans leurs organes aériens (Gisbert et al.,2003) celle-ci nécessite une répétition de cycles de culture avec récolte de la biomasse à la fin de chaque cycle de manière à ne présenter aucun risque de contamination pour l'environnement (Blaylock et Huang.,2000).

IV.10.2. La rhizofiltration

Correspond à l'utilisation des racines pour absorber et accumuler les polluants (métaux) des eaux usées (Jemal et Ghorbal.,2002), mettant en jeu leurs systèmes racinaires d'où le terme de rhizofiltration (Chaudhry et al.,1998).

IV.10.3. La phytostabilisation

Elle consiste à installer des végétaux tolérants la présence de polluants toxiques dans le sol. Ils peuvent également sécréter des substances qui stabilisent chimiquement les métaux lourds au niveau de la rhizosphère, évitant en particulier leur migration vers les eaux de ruissellement et souterraines. Les plantes pouvant également accumuler les métaux lourds dans leur système racinaire sont intéressantes pour la phytostabilisation (Jemal et Ghorbal.,2002).

IV.10.4. La phytovolatilisation

C'est l'utilisation des plantes pour extraire les polluants du sol et les transformer en composés volatils (Jemal et Ghorbal.,2002), peu ou pas toxiques et les relâchant dans l'atmosphère via leurs feuilles (Mcgrath.,1998)

IV.10.5. La phytodégradation

C'est l'utilisation de l'association plantes/microorganismes pour dégrader les polluants organiques du sol (Jemal et Ghorbal.,2002). Dans une autre définition, La phytodégradation est l'accélération de la dégradation des composés organiques polluants (hydrocarbures, pesticides, explosifs...) en présence de plante. Cette dégradation peut avoir lieu soit hors de la plante, grâce à l'activité des micro-organismes présents dans l'environnement des racines (rhizosphère), soit dans la plante après absorption du composé puis dégradation dans les cellules, les plantes produisent des enzymes qui aident catalyser et accélérer les réactions chimiques de dégradation. Les structures moléculaires complexes des contaminants sont dégradées dans des molécules plus simples et moins toxiques (Rudolph.,2010).

IV.11. Le critère de sélection des plantes phytoremédiatrices

La réussite de tout processus de phytoremédiation dépend du choix des espèces végétales capables d'accroître la dégradation des polluants (Vaziri et al.,2013).

Les plantes considérées pour la dépollution doivent avoir une croissance rapide, une forte production de biomasse et être compétitives. Ce type de plantes doivent avoir des niveaux d'absorption les plus élevés et des meilleures capacités de translocation et d'accumulation dans les parties aériennes (Meagher et Heaton.,2005). Il existe différentes approches pour la sélection des plantes aptes à la phytoremédiation des sols contaminés par les hydrocarbures. Elles sont basées sur :

- l'occurrence des plantes sous des conditions climatiques spécifiques (Banks et al.,2003)
- leur résistance à la phytotoxicité pour permettre une extraction optimale du polluant (Kirk et al.,2002),
- la présence des composés phénoliques et des exsudats racinaires (Hegde et Fletcher.,1996),
- les capacités des plantes à réduire la concentration des polluants dans le sol (Ogbo et al.,2009).

De nombreuses plantes sont capables de fixer dans leurs cellules diverses polluantes inorganiques et organiques. Certaines plantes produisent des enzymes qui dégradent ces polluants en des produits moins toxiques ou non-toxiques (Frick et al.,1999).

Ces espèces (Tableau N°9) peuvent servir de guide pour la mise en place des stratégies de phytoremédiation dans plusieurs pays sujets aux problèmes de pollution hydrocarbonée.

Tableau N°09. Association de quelques polluants aux mécanismes de phytoremédiation(Cunningham et al.,1996)

Mécanismes	Polluants associés
Phytoaccumulation/ phytoextraction	Cadmium, chrome, plomb, nickel, zinc et autres métaux lourds, sélénium, radionucléides; BTEX (benzène, toluène éthylbenzène, et xylène), pentachlorophénol, des composés aliphatiques à courte chaîne, et d'autres composés organiques.
Phytodégradation/ phytotransformation	Munitions (DNT, HMX, nitrobenzène, nitroéthane, nitrométhane, nitrotoluène, acide picrique, RDX, TNT), atrazine; solvants chlorés (chloroforme, tétrachlorure de carbone, hexachloroéthane, tétrachloroéthène, trichloroéthène, dichloroéthène, chlorure de vinyle, trichloroéthanol, dichloroéthanol, acide trichloroacétique, acide dichloroacétique, acide monochloroacétique, tétrachlorométhane, trichlorométhane), DDT; dichloroéthène; bromure de méthyle; tétrabromoéthène; tétrachloroéthane; autres chlores et des pesticides à base de phosphore; biphényles polychlorés, d'autres phénols et des nitriles.
Phytostabilisation	Consacré pour les métaux lourds dans les mines des bassins de résidus et prévu pour les phénols chlorés et solvants (tétrachlorure de carbone et le trichlorométhane).
Phytostimulation/ Rhizodégradation	Hydrocarbures aromatiques polycycliques; BTEX (benzène, toluène éthylbenzène, et xylène); autres hydrocarbures petroliers; atrazine; alachlore; biphényles polychlorés (PCB) ; tétrachloroéthane, trichloroéthane et d'autres composés organiques.
Phytovolatilisation	Les solvants chlorés (tétrachloroéthane, trichlorométhane et tétrachlorométhane); mercure et sélénium.
Rhizofiltration	Métaux lourds, produits chimiques et radionucléides

IV.12. Les caractéristiques spécifiques aux espèces végétales testées dans cette étude

Le choix de ces espèces se base sur leur caractéristique potentiellement Phytoremédiatrices du sol. En effet, elles comptent parmi les espèces végétales retrouvées les plus fréquentes (fréquence relative > 10%) et les plus abondantes (recouvrement local > 7%) lors des inventaires floristiques menées sur les sites de déversement d'hydrocarbures dans 4 villes du Cameroun (Nguemté et al.,2017). Les caractéristiques biologiques et écologiques de chaque espèce est détaillé ci-dessous.

IV.12.1. *Eleusine indica* (Linnaeus) Gaertner (Poaceae)

Eleusine indica (figure N°11) est une espèce annuelle. Elle se multiplie uniquement par graines. Un individu produit en moyenne 40000 graines. Cette espèce est répandue dans toutes les régions tropicales (Hutchinson et al.,2014). C'est une espèce héliophile et très nitrophile. Elle se développe des régions sahélo-soudaniennes, dont la pluviométrie annuelle est comprise entre 600 et 800 mm, aux régions soudaniennes plus humides. Elle est rudérale, fréquente en bordure de chemin, dans les terrains vagues et dans les jachères, surtout dans les zones où l'élevage est combiné à l'agriculture.

Cette espèce tolère bien le piétinement et constitue généralement la première ligne de végétation de part et d'autre des chemins de circulation du bétail. C'est également une adventice commune, mais rarement abondante dans les cultures annuelles. Elle se développe principalement dans les sols riches et profonds, limoneux à sablo-limoneux et bien drainés. Elle constitue un bon indicateur écologique de fertilité des sols. Au Nord-Cameroun, c'est une adventice mineure, présente dans 15 % des parcelles cultivées (Le Bourgeois et Merlier.,1995). Elle est plus fréquente et plus abondante dans les champs de case recevant une forte fumure. Le développement de cette espèce est facilement limité par les opérations de travail du sol (labour, sarclage, buttage) précoces. En revanche, elle est difficile à sarcler au stade adulte car elle présente un enracinement puissant.



Figure N°11: *Eleusine indica* (Linnaeus) (Jstor plants., 2016).

IV.12.2. *Cleome ciliata* Schumach. & Thonn. (Capparaceae)

Cleome ciliata (figure N°12) a principalement été étudiée par (Johnson et Seng.,1958). La description des caractéristiques de cette plante est principalement axée sur cette étude.



Figure N°12: *Cleome ciliata* Schumach (Tela botanica.,2021)

Plante africaine tropicale d'origine (Hutchinson et al.,2014), *Cleome ciliata* est largement distribué à la fois en Afrique tropicale et en Jamaïque. Son système racinaire est constitué de racines s'étendant horizontalement et formant un tapis circulaire à une profondeur de 5-10 cm de la surface. Pour une plante bien développée qui s'étend sur une superficie de 120-160 cm de diamètre, le système racinaire forme un tapis d'environ 60 cm en diamètre.

La plante pousse érigée à une hauteur de 30 cm, puis tombe à plat sur le sol où elle continue à pousser et fleurir. De telles plantes tentaculaires ont une bonne chance de survie dans un environnement perturbé. Les fleurs de *C. ciliata* sont nettement dimorphes par rapport aux ovaires de la fleur mature. Dans la fleur de l'ovaire normal, l'ovaire mature est presque aussi long que les filaments de la plus courte paire d'étamines (8-10 mm de long), environ 1 mm de diamètre et porte un stigmate collant rose. Dans la fleur de l'ovaire court, la maturité de l'ovaire est seulement 2-3 mm de long et 0,5 mm de diamètre. La stigmatisation est verte et non développée et aucune graine n'est définie.

IV.12.3. *Cynodon dactylon* (L.) Pers. (Poaceae)

Cynodon dactylon (figure N°13) est une plante vivace de 10-40 cm, étalée, très dense, poilue sur les feuilles, à rhizomes longuement traçants. Ses tiges sont droites et très ramifiées. Elles donnent naissance, à la surface du sol, soit à des pousses dressées qui portent les futures inflorescences, soit à des rameaux rampants à l'origine de nouvelles tiges souterraines. Les feuilles sont étroites et disposées à plat, de part et d'autre de la tige. Elles sont en général dépourvues de poils. Les nœuds et les gaines ne sont pas ou très peu poilus. L'inflorescence est dressée, portant à son extrémité 3 à 7 épis fins et longs insérés à l'extrémité de la tige comme les doigts d'une main.

Espèce vivace ou pérenne, *Cynodon dactylon* se multiplie par graines, mais se propage principalement par boutures, par rejets et par ses tiges souterraines. L'inflorescence est une ombelle simple d'épis, le fruit un caryopse. Espèce hermaphrodite à pollinisation anémogame, elle fleurie de août à octobre.



Figure N°13: *Cynodon dactylon* (L) (catalogue of life.,2020)

IV.13. Avantages et inconvénients de la phytoremédiation

IV.13.1. Les avantages

La technique présente de nombreux avantages :

- ❖ Par comparaison avec les traitements physico-chimiques, la phytoremédiation montre un faible coût (se situe en moyenne entre 2 et 100 dollars / m³).
- ❖ Ce faible coût permet de traiter de grandes surfaces.
- ❖ Elle provoque une perturbation minimale de l'environnement et permet même de réinitier le cycle de dégradation de la matière organique là où la végétation avait disparu.
- ❖ La décontamination par les plantes présente aussi l'avantage de réduire l'érosion et le lessivage des sites, ce qui maintient le polluant à proximité de la plante (Berti et al.,1995).
- ❖ Très peu de modification de la topographie existante du site.
- ❖ récupération et réutilisation de métaux de valeur peut être possible (des entreprises se spécialisent dans le «hytominage») (Rudolph.,2010).

IV.13.2. Les inconvénients

En regard de ses nombreux avantages, la phytoremédiation ne présente que peu de limitations :

- ❖ La phytoremédiation est limitée à la surface et la profondeur occupée par les racines- environ 80 cm (noter que de nombreux polluants à base de métaux restent aussi dans la couche de sol supérieure); peut-être plus profond en cas d'utilisation d'arbres.
- ❖ Le temps: croissance lente et biomasse faible demandent un investissement en temps assez important pour la dépollution pouvant aller jusqu'à des dizaines d'années.
- ❖ On ne peut pas, avec des systèmes de remédiation à base de plantes, totalement empêcher l'écoulement des contaminants dans la nappe phréatique.
- ❖ Le niveau et le type de contamination influence la phytotoxicité des polluants (dans certains cas, la croissance ou la survie des plantes peut être réduite).
- ❖ Problème de multi-pollutions qui limite le choix des plantes.
- ❖ Possible de bioaccumulation de contaminants passant dans la chaîne alimentaire, du niveau des consommateurs primaires à ceux du niveau secondaire. Il est essentiel de disposer des plantes de façon responsable, et de ne pas consommer des plantes utilisées pour nettoyer un terrain (Rudolph.,2010).

D'après Rudolph (2010), il faut noter qu'il y a des recherches en cours concernant les plantes génétiquement modifiées pour améliorer la capacité hyperaccumulatrice de ces plantes afin de trouver des plantes plus résistantes à des niveaux de pollutions élevés, comme par exemple : *Eichornia crassipes* L., *Brassica*, *Festuca*, *Trifolium pratense* L..

Conclusion

La phytoremédiation repose sur les interactions dans le système sol-plante-microorganismes, en particulier au niveau de la rhizosphère. La rhizosphère est en effet une zone d'activité biologique intense qui modifie les conditions physico-chimiques du sol global et par conséquent la spéciation des métaux, leur mobilité dans le sol et leur biodisponibilité pour la plante. La croissance de la plante induit des flux d'eau et de solutés à l'interface sol-racine, modifiant ainsi la composition de la solution du sol dans l'environnement racinaire.

Les racines excrètent des ions ou des composés organiques dans le sol (protons, ligands et acides organiques, enzymes, CO₂, etc.). Enfin, l'activité microbienne dans la rhizosphère conduit à l'excrétion d'agents complexant extracellulaires. Ces différentes actions modifient les conditions physico-chimiques dans la rhizosphère (pH, potentiel d'oxydoréduction, etc.) et affectent ainsi la composition du sol, la spéciation des métaux (dissolution et précipitation de minéraux, adsorption, désorption, complexations, etc.), et par conséquent, le prélèvement et l'incorporation des métaux par la plante. La plante apparaît comme le moteur essentiel de l'exportation d'un polluant.



Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

Les rejets d'eaux usées ont entraîné une dégradation et une contamination de l'environnement et ont modifié l'abondance et la diversité des êtres vivants. Les eaux usées sont aussi des sources importantes de substances toxiques parmi lesquelles certaines sont persistantes et bioaccumulables et qui ont des effets chroniques chez les organismes aquatiques. Des substances capables de perturber l'environnement ont aussi été décelées dans les ERU, mais la rareté de l'information sur leur présence et les réactions à leur exposition rendent difficile l'évaluation des risques que posent actuellement ces substances. Parmi les autres enjeux pour lesquels on dispose de peu de renseignements, il y a lieu de mentionner les concentrations et les effets sur la santé humaine et l'environnement des différents types qui pénètrent dans les eaux de surface ou souterraines à partir des eaux usées rejetées.

En effet les scientifiques sont toujours à la recherche du meilleur moyen permettant l'épuration des eaux usées avec le minimum de dépense et le maximum d'efficacité. La phytoépuration s'avère un moyen d'épuration écologique est avantageux à plus d'un titre.

Les marais artificiels filtrants ou la phytoépuration veut dire l'action de l'épuration des eaux usées en présence de plantes. Elle peut être réalisée à travers différents systèmes, caractérisé 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 dépurature naturelle, qui s'effectue à cause du processus d'aération, sédimentation, absorption et métabolisation de la part des microorganismes et de la flore. Les systèmes de phytoépuration sont utilisés pour la dépurature d'eaux de différentes provenances et avec caractéristiques différentes. En général, comparé avec les méthodes traditionnelles, ils demandent un assez grand besoin de surface mais nécessitent moins d'énergie et de technologie. Les systèmes de phytoépuration peuvent être uniques ou en complément avec d'autre système. Une série de lits de gravier végétée à travers laquelle s'écoulent les rejets de manière continue, ou hybride (ex. un lit à écoulement horizontal suivi par un autre à écoulement vertical). Un système de traitement des eaux usées utilisant les plantes aquatiques peut être aisément implanté, il serait judicieux d'adapter la culture d'une plante aquatique dans un substrat pour filtrer la charge polluante d'une eau usée.

La performance des marais artificiels filtrant à épurer les eaux usées dépend du rôle de tous les composants de ces lits. Chacun de ces derniers prend un rôle bien déterminé selon l'environnement où il se trouve et la qualité d'eau à épurer. Cela explique l'importance de tous les procédés d'épuration tels que la nitrification, dénitrification, déphosphoration, l'oxydoréduction ...etc.

L'un des objectifs de ce travail était de mettre en évidence les potentialités de quelque plantes endémique à épurer les eaux usées, ainsi que le rôle des différents types de substance dans la performance de traitement. Ces eaux sont chargées de polluants de nature, organique et minérale ainsi que des germes pathogènes qui provoquent notamment des maladies épidémiques. Il est entièrement consacré à une comparaison entre des plantes utilisées à savoir (*Le roseau commun*, *Papyrus*, *Typha Latifolia*, *Eleusine indica*, *Cleome ciliata Schumach*, *Cynodon dactylon*), pour traiter les eaux usées.

Conclusion générale

Le dispositif expérimental, installé in situ, fonctionne dans des conditions naturelles. Ces conditions semblent être favorables au fonctionnement du protocole où les conditions climatiques se rapprochent des besoins écologiques des écosystèmes utilisés (les filtres plantés de macrophytes) de point de vue ensoleillement, température, évaporation etc., sachant que les eaux usées sont riches en matières organiques et au nutriment.

Les résultats obtenus à l'issue de cette étude montrent que le pH est presque neutre ce qui est dû à l'alcalinisation du milieu. Les abattements des paramètres de pollution sont satisfaisants grâce à l'action conjuguée des macrophytes, des bactéries et de la barrière physique que constitue le massif. Cependant, nous pensons que travailler sur plusieurs années peut permettre de dégager le comportement dans la durée des plantes utilisées en termes de performances épuratoires et d'adaptabilité aux conditions climatiques et également de charges organiques et hydrauliques croissantes, car des travaux antérieurs ont montré que les performances des plantes s'améliorent de la première à la deuxième année ce avec le développement du système racinaire (qui est remarqué pour notre étude). Néanmoins pour une première approche, les plantes ont aussi un effet mécanique par la filtration des particules via le système racinaire, ce qui a limité la quantité de MES à la sortie de tous les filtres plantés comparativement au contrôle non plantés. Le rendement épuratoire dépasse les 90% pour tous les filtres plantés utilisés. *Le roseau commun*, *Papyrus*, *Typha Latifolia*, semblent être plus rentable par rapport à l'élimination de tous les polluants des eaux usées domestiques. *Le Typha latifolia* étaient très rentable concernant l'élimination de l'azote ammoniacale et les phosphates. Le point commun entre ces plantes a été la diffusion d'oxygène dans la rhizosphère, ce qui a favorisé la nitrification de l'ammoniaque en nitrate. L'ammoniaque contenue dans les rejets des eaux usées a aussi été traitée de façon plus efficace dans les marais plantés

Le papyrus, *Le roseau commun*, *Cleome ciliata Schumacher*, *Cynodon dactylon*, *le Typha latifolia* ont réduit davantage le NO^{-3} comparativement au *Nerium oleander*. *L'eleusine indica* a montré son efficacité dans l'élimination des sulfates. De façon générale, les filtres plantés de macrophytes sont un meilleur moyen d'assurer une élimination efficace des pollutions.

L'effet positif des plantes est généralement spécifique à l'espèce utilisée, ce qui indique un impact particulier de la physiologie de la plante sur l'enlèvement des polluants. L'effet de chaque espèce sur le traitement serait dû à un ou plusieurs facteurs présentés. Il est à noter que même sous des conditions extrêmement différentes, l'effet des plantes reste similaire à celui du traitement d'effluent municipal, montrant ainsi la versatilité de ces systèmes. Il est présumé que le rôle bénéfique des plantes en marais filtrant est issu en grande partie de l'influence de la rhizosphère sur les microorganismes responsables de la biodégradation des polluants. Il serait donc intéressant que des recherches futures s'orientent sur la microbiologie des marais filtrants artificiels afin de mieux comprendre les mécanismes d'épuration engendrés par cette interaction entre l'écosystème microbien et les macrophytes. Il serait tout aussi intéressant de faire ces mesures microbiennes en été comme en hiver et avec différents polluants afin de voir les limitations de ces systèmes biologiques.

Les conditions et paramètres à prendre en compte sont nombreux pour assurer un bon fonctionnement de la station dans le futur. Le processus qui a lieu et qui permet l'épuration de l'eau ensuite, nécessite une connaissance pointue des réactions chimiques ayant lieu sans que l'on puisse a priori les maîtriser puisqu'elles sont issues d'un processus naturel. Toutes ces connaissances ont donc

Conclusion générale

permis d'aboutir à la conception d'un système fiable, pour lequel on observe de très bons rendements et dont le principal avantage est la faible consommation en énergie. Il ne faut toutefois pas oublier que le système connaît de nombreuses limites et n'est de loin pas applicable à l'épuration des eaux d'une ville. Des études sont aujourd'hui en cours pour déterminer les améliorations à apporter au système pour essayer de dépasser ces nombreuses limites.

En outre, la phytoépuration est un très bon système d'épuration des eaux usées et est sûrement la solution de demain surtout en matière écologique. A ce jour le système phytoépuration a démontré sa performance pour les agglomérations de moins de 10 000 habitants, ainsi que pour les particuliers qui ne bénéficient pas du réseau d'assainissement collectif. Il faut ajouter qu'il n'y a aucune nuisance si le système choisis est bien conçu et bien dimensionnés.

Enfin, ce travail nous a permis de constater qu'une station de phytoépuration est faisable dans les régions semi-arides que ce soit pour l'existence des plantes endémiques épuratrice ou pour le substrat naturel existant. On peut même affirmer que les zones arides sont plus efficaces que les zones tempérées ceci est prouvé par le rendement épuratoire qui a dépassé les 70% pour tous les polluants.

Referances Bibliographiques

Referances Bibliographiques

Andriamirado L, et al, 2005: Memento technique de l'eau, Tome 1, Degrémont, France.

Anne,2001: Epuration des eaux usées domestiques par les bassins à plantes aquatiques. Rivière de l'association Eau Vivante .

Anne rivières, 2005: Gestion écologique de l'eau, volume 1, Association eau vivante

Ansoia G, Fernfindez C, Luis E, 1995 : Removal of organic matter and nutrients from urban wastewater by using an experimental emergent aquatic macrophyte system, faculty of biology, university of Leon, Spain, Elsevier ecological engineering.

Astebol, S.O, Hvitved-Jabobsen 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 .

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, 1997 : Réutilisation des eaux usées épurées , risques sanitaires et faisabilité en Île-de-France .

Bensmina M L,etal, 2013: Capacité de filtres plantés de macrophytes pour l'épuration des eaux usées dans le climat semi-aride. Courrier du Savoir .

Beiere, 2009 : Eco-gestion d'habitats Bureau d'Etudes Industrielles Energies Renouvelables et Environnement .

Brix H, 1994: Functions of macro- phytes in constructed wetlands. Wat. Sci. Tech. vol.29,

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

Chelle F, et Dellale M,2005: Festival des sciences de la ville. Séminaire.France.

Cherrak R et BENDIA N,2006: Traitement biologique des effluents liquides de la raffinerie d'Arzew.

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 Inter-Environnement Wallonie

Referances Bibliographiques

- Dugniolle H, 1980:** L'assainissement des eaux résiduaires domestiques, CSTC - revue n° 3-septembre .
- Edeline J M, Pham P, Weinberger NM,1993:** Rapid development of learning-induced receptive field plasticity in the auditory cortex.
- Gaid A, 1984 :** Epuration biologique des eaux usées urbaines », Tome I et Tome II, Ed. Office des publications universitaires.
- García P,et al ,2005:** Effect of key design parameters on the efficiency of horizontal subsurface flow constructed wetlands. Ecol. Eng.
- Grison, 1999:** Epuration des eaux uses par des filters plantés de macrophytes, étude bibliographie agence de l'eau Rhone Méditerrané et Corse ,
- Grosclaude, Gérard, dir. ,1999:** L'eau, tome 1 : Milieu naturel et maîtrise et tome 2 : Usages et polluants. Versailles, Institut National de la recherche Agronomique
- Hazourli S, Boudiba L et Ziati M, 2007:** Caractérisation de la pollution des eaux résiduaires de la zone industrielle d'EL-HADJAR, ANNABA, laryss journal, n° 06 .
- Houari et Kherroubi , 2007:** propriétés, analyse physico chimique et bactériologique de l'eau potable dans la ville de CHLEF et ses environs .
- Jetten, J, et al,2011:** The Social Cure: Identity, health, and well-being. New York: Psychology Press.
- Jetten MS, et all, 2001:"**Microbiology and application of the anaerobic ammonium oxidation ('anammox').
- Johnson, B.R., Hill, K., 2002:** Ecology and design, Frameworks for learning, Island Press, Washington D.C.
- JORA, 1993:** Journal Officiel de la République Algérienne n° 46. Décret exécutif n° 93-160 du 10 juillet 1993 réglementant les rejets.
- Kleche M, 2013:**Utilisation des systèmes biologiques dans l'épuration des eaux usées cas de la région d'Annaba. Thèse de Doctorat, Université d'Annaba.
- Kone D, 2002:** Epuration des eaux usées par lagunage à microphytes et à macrophytes en Afrique de l'ouest et du centre: état des lieux, performances épuratoires et critères de dimensionnement, Thèse de Doctorat, Univ de Luxembourgaise, Belgique,
- Chellé F., Dellale M., Dewachter M., Mapakou F., Vermey L,2005 :** L'épuration des eaux: pourquoi et comment épurer Office international de l'eau, 15p.
- Cshapf, 1995:** Recommandations sanitaires relatives à la désinfection des eaux usées urbaines, 22p.
- Degrémont Mémento, 1972 :** « technique de l'eau ». Paris : Dégriment.

Referances Bibliographiques

- Degrémont, 1978** : Mémento technique de l'eau : 8ème édition. Edition Technique et Documentation Lavoisier, 1200p.
- Degrémont,1989** : Mémento technique de l'eau : vol. 1, 9ème édition. Edition Technique et Documentation Lavoisier, 592p.
- Desjardins R,1997** : Le traitement des eaux. 2ème édition. Ed. Ecole polytechnique.
- Eckenfelder W.W, 1982** : Gestion des eaux usées urbaines et industrielles. Ed. Lavoisier. Paris, 503p.
- Edline F,1979** : L'épuration biologique des eaux résiduaires. Ed. CEBEDOC, Paris, 306p.
- Edline F, 1996** : L'épuration physico-chimique des eaux.3eme édition. Ed. CEBEDOC,
- Encyclopedia,1995** : Industrial chemistry, Water in Ull man's, Wiley-VCH Verlags, vol.8. épuration. Techniques, Sciences et Méthodes, 2 : 81-118.
- Faby J.A., Brissaud F,1997** : L'utilisation des eaux usées épurées en irrigation. Office
- FAO. 2003** : L'irrigation avec des eaux usées traitées : Manuel d'utilisation. FAO Irrigation and Drainage paper, 65p.
- Galaf F et S. Ghanna M, 2003** : « Contribution à l'élaboration d'un manuel et d'un site Websur la pollution du milieu marin ». Mémoire d'ingénieur d'état. Université.
- Hamsa D, 2006** : « Utilisation des eaux d'une station d'épuration pour l'irrigation des essences forestières urbains», mémoire de fin d'étude de Magistère en Ecologie et Environnement Université de Constantine.
- Koller E., 2004.** Traitement des pollutions industrielles : eau, air, déchets, sols, boues. Edition DUNOD, 424p
- Keck G. et Vernus E, 2000** :« Déchets et risques pour la santé », Techniques de l'Ingénieur, Paris, 2450p.
- Legube B, 1996**:« le traitement des eaux superficielle pour la production d'eau potable », agence de l'eau loir -Bretagne
- Martin G. 1979** : Le problème de l'azote dans les eaux. Ed technique et documentation, Paris, 279p.
- ANAT, 2002** : Etude « schéma directeur des ressources en eau » wilaya de Biskra. Phase préliminaire, 100p.
- ANAT ,2003** : Étude Schéma directeur des ressources en eau de la Wilaya de Biskra. Dossier Agro-Pédologique.
- Anfossi S., Billiard E., Bonnet M., Henriot F., Kraemer F., Lechenne L., Le Herissier M., Lorin S., 1997** : Les métaux lourds. École nationale supérieure des mines de Saint-Etienne 49p.
- Anonyme, 2001** : Pollution du sol : danger. INRA – OPIE.
- Anonyme, 2002** : Pesticides et protection phytosanitaire dans une agriculture en mouvement. Association de Coordination Technique agricole, Paris. 976 p.

Referances Bibliographiques

Anonyme, 2003 : Les engrais et leurs applications. Précis à l'usage des agents de vulgarisation agricole. 04em éd. FAO, IFA et IMPHOS. Rabat. 77 p.

Anonyme, 2007 : Index des produits phytosanitaires à usage agricole. Direction de la protection des végétaux et des contrôles techniques, Ed. 2007. Alger. Pp 8.

Anonyme, 2010 : Weather. Climate. Africa. Algeria. Biskra. www.Tutiempo.net/en.

Anonyme, 1980 : La carte hydrogéologique de Biskra au 1/200.000. Notice explicative. Ministre de l'hydrolique. 51 p.

Baize D., 1997 : Teneurs totale en éléments traces métalliques dans les sols (France). INRA. Paris .406 p.

Baize D., 2000 : Guide des analyses en pédologie. 2ème éd. INRA. Paris .257 p.

Biout F.Z., Besbes M. et Larbes A., 2005 : Etude sur modèle mathématique de système aquifère de la région de Biskra. Colloque internationale sur les ressources en eau souterraines du Sahara - CIRESS - Ouargla.

Bliefert C., et Perraud R., 1997 : Chimie de l'environnement : Air, Eau, Sols, Déchets. 1ère éd. Espagne. 477p.

Chelouai N., 2010 : L'effet toxique des produits phytosanitaires et des engrais sur l'abondance des métaux lourds (Cu, Zn) dans le sol et le végétal (dans la région de Biskra). Thèse Ing. Ins. d'agro. Biskra, 93p.

Clément M., et Françoise P., 1998 : Analyse physique des sols : méthodes choisisses. 3 éd. Londre-Paris- New York. 387p.

Clément M., et Françoise P., 2003 : Analyse chimique des sols : méthodes choisisses. Éd TEC et DOC Londre-Paris- New York.. 388p.

Coïc Y., et Coppenet M., 1989 : Les oligo-éléments en agriculture et élevage. INRA. Paris : 113 p.

Couteux A. et Lejeune V., 2006 : Indexe phytosanitaire ACTA 2007. 43 éd. Paris. 832 p

Couture I., 2004 : Analyse d'eau pour fin d'irrigation. AGRI-VISION.

Dajoz R., 1971 : Précis d'écologie. Dunod : Paris. 434 p.

Deneux-Mustin S., Roussel-debet S., Mustin C., Henner P., Munier-Lamy C., Colle C., Berthelin J., Garnier-Laplace J., leyval C., 2003 Mobilité et transfert racinaire des éléments en traces : influence des micro-organismes du sol. Lavoisier. Londre-Paris- New York. 281 p.

ENITA. 2000. Agronomie : des bases aux nouvelles orientations. Ed. Bordeaux : Synthèse agricole. 339 p.

Gérard MIQUEL M., 2001 Les effets des métaux lourds sur l'environnement et la santé. Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques. France. 366 p.

Referances Bibliographiques

Giroux M., Chassé R., Deschênes L. et Côté D., 2005 Étude sur les teneurs, la distribution et la mobilité du cuivre et du zinc dans un sol fertilisé à long terme avec des lisiers de porcs au Québec. *Agrosol*. vol. 16, n° 01, Pp 23-32.

Gouskov N., 1964 Notice explicative de la carte géologique de Biskra au 1/200.000. Pubi. Sr. Géol. Algérie. 13p.

Guemaz F., 2006 Analyses physico-chimiques et bactériologiques des eaux usées des trois sites de la ville de Biskra (Chaabet Roba, Oued Biskra et Oued Zemour). Thèse Magister. Inst. d'agro. Annaba. 83 p.

Halitim A., 1988 Sols des régions arides d'Algérie. O.P.U. Alger. 384 p.

Kadlec, R.H., Wallace, S. (2009). *Treatment wetlands* CRC Press/Taylor & Francis Group: Boca Raton, Florida, United States. 2nd edition. 120pp.

Keith R. Hench, Gary K. Bissonnette, Alan J. Sexstone, Jerry G. Coleman, Keith Garbutt, Jeffrey G. Skousena, (2003). Fate of physical, chemical, and microbial contaminants in domestic wastewater following treatment by small constructed wetlands *Water Research* 37 p. 921–927.

Lalmi Abdelmadjid (2009). Evolution des caractères physiques et mécaniques d'un sol argileux sous irrigation du périmètre de l'ITDAS d'El-Outaya. (W. BISKRA). Incidence sur le travail du sol. Mémoire Pour l'obtention du diplôme de Magister en Sciences Agronomiques Option : Phytotechnie.

Liu, W., Dahab, M.F et Surampalli, R.Y., (2005). Nitrogen transformations modelling in subsurface-flow constructed wetlands. *Water environ. res.* 77, 246–258.

Lynch, P.A., B.J. Gilpin, L.W. Sinton, and M.G. Savill. (2002). The detection of *Bi.dobacterium adolescentis* by colony hybridization as an indicator of human faecal pollution. *J. Appl. Microbiol.* 92: p.526–533.

Marika Truu, Jaanis Juhanson, Jaak Truu. (2010). Microbial biomass, activity and community composition in constructed wetlands. *Science of the total environment*, 407, 3958-3971.

Metcalf et Eddy (2003). "Wastewater Engineering- Treatment and Reuse", Editions McGraw Hill, 4^{ième} édition, 233pp.

Mimeche Leila Mahmoud Debabeche , Halima Mancer (2012). Analyse du Pouvoir Epuratoire D'un Filtre Implante de Phragmite Australis Pour le Traitement des Eaux Usées Sous Climat Semi-Aride- Region de Biskra. *Journal International Environmental Conflict Management*, Santa Catarina Brazil, 1, pp. 10-15.

Mireille Vila (2006). Utilisation de plantes agronomiques et lacustres dans la dépollution des sols contaminés par le RDX et le TNT : approches en laboratoire. Le titre de docteur de l'Institut National Polytechnique de Toulouse

Referances Bibliographiques

Odum H.T., Odum B. (2003). Concepts and methods of ecological engineering, Ecological Engineering 20: p.339-361.

Olanrewaju B. S, Moustier P, Mougeot L .A, Fall A, (2004). Développement durable de l'agriculture urbaine en Afrique francophone Enjeux, concepts et méthodes, CIRAD et CRDI, Sénégal, 173 pp.

Organisation mondiale de la santé (OMS) (2000). Global Water Supply and Sanitation. Assessment Report, <http://www.who.int/Topics/sanitation/ifr>.

Paul Daniel Sindilariu, Alexander Brinker, Reinhard Reiter. (2009). Fators influencing the efficiency of constructed wetlands used for the treatment of intensive trout farm effluent. Ecologie modelling 520-532.

l'US.EPA (United States Environmental Protection Agency),

l'APAT (linee guida per la progettazione e gestione di zone umide artificiali per la depurazione dei reflui civile)