

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE**



**Université Abbès Laghrour Khenchela
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département d'Ecologie et Environnement**

Réf :

**Mémoire de fin d'étude
Présenté en vue de l'obtention du diplôme de
Master Professionnel
Filière : Ecologie et environnement
Option : Protection et Décontamination des Eaux et des Sols Pollués**

Thème

**Contribution à l'étude de
la phytoremédiation des eaux polluées**

Présenté par : Rabia Charaf Eddine

Soutenu publiquement le : 02 / 06 / 2016

Devant le jury :

**Président : Houha Belkacem professeur des universités. Université Abbas Laghrour
Khenchela**

Examineur : Benhizia Toufik M.A.B. Université Abbas Laghrour Khenchela

Encadreur : Lakhdari Somia M.A.A. Université Abbas Laghrour Khenchela

Année universitaire : 2015/2016

Remerciement

Nous remercions Dieu, le Tout Puissant, le Miséricordieux, qui nous a donné l'opportunité de mener à bien ce travail.

Loin d'être exhaustif nous estimant cette étude achevée en se bornant à une initiation de recherche, personnellement je ne pourrai nier ni cacher l'empreinte de certaines personnes qu'en m'avaient laissé au fond de mon esprit scientifique que j'estime si j'ose le dire capitale pour le restant de ma vie, et de tout mon cœur je tiens alors leur exprimé ma reconnaissance.

Je suis ravi d'étendre mes sincères remerciements à l'égard de mon encadreur, madame **Lakhdari Soumia**, pour sa confiance, ses remarques et ses conseils, sa disponibilité et sa bienveillance, qui n'a ménagé aucun effort pour la bonne réussite de ces recherches

Je tiens à exprimé ma gratitude au **Pr. Houha Belgacem** professeur à l'université Abbass Laghrour Khenchela de m'avoir fait honneur de présider le jury de soutenance. Je remercie vivement **Dr. Benhizia Toufik** Maître assistant A, à l'université Abbass Laghrour Khenchela d'avoir accepté de juger mon mémoire de master.

Je tiens à remercier monsieur **Ziouch Omar Ramzi** Maître de conférence B, à l'université Abbass Laghrour Khenchela que vraiment je ne trouve pas l'expression idéale de lui traduire ma reconnaissance, je pourrai cordialement lui exprimé mes profonds remerciements.

Je remercie vivement **madame Ababsa Nawel** Maître assistant A, à l'université Abbass Laghrour Khenchela pour son aides et ces conseils.

A tous nos enseignants qui nous ont initiés aux valeurs authentiques, en signe de notre profond respect.

Dédicaces

Grâce à Dieu, le tout puissant, j'ai accompli ce travail dans l'effort et l'abnégation : je dédie cette modeste contribution scientifique.

*Aux deux êtres les plus chères au monde,
Mon père mon idole dans la vis et
À la plus belle créature que Dieu a créée sur terre,
À cette source de tendresse, de patience et de générosité,,
À ma mère le soleil de mes jours.*

Que dieu leur procure bonne santé et longue vie.

À mes frères : Salah, Saber, Tarek

À ma chère sœur : Soumia et sa fille Sissa

À ma chère sœur : Amina et sa fille Imy

À ma chère besboussa : manel

À toute ma famille

À tous mes amis

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis merci.

TABLE DES MATIERES

Introduction générale	01
Chapitre I : pollution	
I.1.Introduction	02
I.2. Les différents types de pollution	02
I.2.1. Pollution atmosphérique	02
I.2.1.1. Définition	02
I.2.1.2. Sources de pollution atmosphérique	02
I.2.1.3. Les différentes échelles de la pollution atmosphérique	03
I.2.1.4. Polluants atmosphériques	04
I.2.2. Pollution des eaux	13
I.2.2.1. Définition	13
I.2.2.2. Les différentes sources de pollution	14
I.2.2.3. Nature de la pollution	15
I.2.2.4. Degré de la pollution	16
I.2.2.5. Les principaux paramètres physico- chimiques de pollution	19
I.2.2.5.1.La Température	19
I.2.2.5.2. La Conductivité électrique	19
I.2.2.5.3. La Turbidité	20
I.2.2.5.4. La Couleur	20
I.2.2.5.5. Le pH	20
I.2.2.5.6. L'oxygène dissous	21
I.2.2.5.7. Les matières en suspension	21
I.2.2.5.8. La demande biochimique en Oxygène (DBO)	21
I.2.2.5.9. La demande chimique en oxygène (DCO)	22
I.2.2.6. L'impact des eaux usées sur l'environnement et la sante	23
I.2.3. Pollution des sols	23
I.2.3.1. Définition	23
I.2.3.2. Formes de pollution	24
I.2.3.3. Micropolluants des sols	24
I.3. Conclusion	27

Chapitre II : La phytoremédiation

II.1. Introduction	28
II.2. la phytoremédiation	28
II.2.1. Définition	28
II.2.2. Historique de la Phytoremédiation	28
II.2.3. Les différents modes de phytoremédiation	29
II.2.4. Les types de phytoremédiation	31
II.2.4.1. la phytoremédiation à microphytes	31
II.2.4.2. la phytoremédiation à macrophytes	31
II.2.5. Principales caractéristiques de l'épuration par lits plantés	32
II.2.6. Filtres plantés de roseaux	33
II.2.7. Les systèmes hybrides	35
II.2.8. Les mécanismes d'élimination et les performances épuratoires	36
II.3. Conclusion	38

Chapitre III : matériels et Méthodes

III.1. Introduction	39
III.2. Aperçu général sur la zone d'étude	39
III.3. le point d'étude	40
III.3.1. Donnée générale de la station	42
III.3.2. Bases de dimensionnement des ouvrages	43
III.3.3. Qualité des eaux épurées rejetés	43
III.4. choix des plantes	43
III.5. les analyses effectuées	46
III.6. Conclusion	50

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.1. Introduction	51
IV.2. Caractéristiques physico-chimiques des eaux usées	51
IV.3. Variations des paramètres physico-chimiques	52
IV.3.1. Le pH	52
IV.3.2. les MES	53
IV.3.3. La Salinité	53
IV.3.4. La température	54

IV.3.5. La conductivité électrique	55
IV.3.6. L'oxygène dissous	55
IV.3.7. La DBO ₅	56
IV.3.8. La DCO	57
IV.3.9. les nitrites	57
IV.3.10. les nitrates	58
IV.3.11. les phosphates	58
IV.4. Conclusion	59
Conclusion générale	60
Bibliographie	
Annexes	

Liste des figures

Figure I.1 : Exemple de transfert de matière et d'énergie dans un écosystème lacustre	16
Figure I.2 : Exemple d'impact de l'introduction d'un polluant dans un lac	17
Figure I.3 : Rivière en eutrophie (c Ph.Calandre)	18
Figure II.1 : Les différentes formes de phytoremédiation	30
Figure II.2 : Schéma d'un filtre planté de roseaux à écoulement vertical (<i>Stoter Denis, 2009</i>).....	33
Figure II.3 : Schéma d'un filtre planté de roseaux à écoulement horizontal (<i>Stoter. Denis, 2009</i>)	35
Figure II.4 : coupe transversale schématique d'un filtre à écoulement hybride (<i>Hendrik, 2008</i>) ..	36
Figure III.1 : Localisation de la commune de Tamza dans la wilaya de Khenchela	40
Figure III.2 : Localisation de la commune de Tamza dans l'Algérie	40
Figure III.3 : Rejet des collectivités de la commune de Tamza	41
Figure III.4 : Typha Latifolia	44
Figure III.5 : Typha Latifolia Hors-sol	45
Figure III.6 : Les racines de Typha Latifolia souterraine	46
Figure III.7 : Multi-paramètre	48
Figure III.8 : spectrophotomètre	48
Figure III.9 : colorimètre	49
Figure III.10 : Oxytop / 6 postes wtw	49
Figure IV.1 : Evolution du pH dans les eaux récupérées des bassins plantés par rapport aux eaux brutes	52
Figure IV.2 : Evolution du MES dans les eaux récupérées des bassins plantés par rapport aux eaux brutes	53
Figure IV.3 : Evolution de la salinité dans les eaux récupérées des bassins plantés par rapport aux eaux brutes	54
Figure IV.4 : Evolution de la conductivité électrique dans les eaux récupérées des bassins plantés par rapport aux eaux brutes	54
Figure IV.5 : Evolution de la température dans les eaux récupérées des bassins plantés par rapport aux eaux brutes	55

Figure IV.6 : Evolution de l'oxygène dissous dans les eaux récupérées des bassins plantés par rapport aux eaux brutes	56
Figure IV.7 : Evolution de la DBO ₅ dans les eaux récupérées des bassins plantés par rapport aux eaux brutes	56
Figure IV.8 : Evolution de la DCO dans les eaux récupérées des bassins plantés par rapport aux eaux brutes	57
Figure IV.9 : Evolution de la concentration des nitrites dans les eaux récupérées des bassins plantés par rapport aux eaux brutes	58
Figure IV.10 : Evolution de la concentration des nitrates dans les eaux récupérées des bassins plantés par rapport aux eaux brutes	58
Figure IV.11 : Evolution de la concentration des phosphates dans les eaux récupérées des bassins plantés par rapport aux eaux brutes	59

Liste des tableaux

Tableau I.1: Classification des eaux d'après leurs conductivités (AFNOR)	21
Tableau I.2: Classification des eaux d'après leur pH (AFNOR)	20
Tableau I.3: Echelle de valeurs de DBO5 (AFNOR)	22
Tableau III.1: Caractéristiques géographiques de la commune de Tamza.....	39
Tableau III.2: Donnée générale de la station de Tamza	42
Tableau III.3: charge hydraulique de la station de Tamza	43
Tableau III.4: charge polluante de la station de Tamza	43
Tableau III.5: Qualité des eaux épurées rejetés de la station de Tamza	43
Tableau III.6: Caractéristique physico chimiques des eaux usées de la commune de Tamza (échantillon 1 : le 19-01-2016)	46
Tableau III.7: Caractéristique physico chimiques des eaux usées de la commune de Tamza (échantillon 2 : le 02-02-2016)	47
Tableau III.8: Caractéristique physico chimiques des eaux usées de la commune de Tamza (échantillon 3 : le 17-03-2016)	47
Tableau III.9: Matériels utilisées pour analyse physico chimique	47
Tableau IV.1: caractéristiques physico-chimiques des eaux usées (Echantillon 1)	51
Tableau IV.2: caractéristiques physico-chimiques des eaux usées (Echantillon 2)	51
Tableau IV.3: caractéristiques physico-chimiques des eaux usées (Echantillon 3)	52

Liste des abréviations

CO : le monoxyde de carbone

NO_x : les oxydes d'azote

SO₂ : le dioxyde de soufre

CO₂ : dioxyde de Carbone

O₂ : Oxygène moléculaire

NO : L'oxyde nitrique

NO₂ : dioxyde d'azote

O₃ : L'ozone

CH₄ : Méthane

N₂O : Protoxyde d'azote

CFC : Chlorofluorocarbures

HFC : Hydrofluorocarbures

HF : Acide fluorhydrique

H₂S : Hydrogène sulfure

PFC : Perfluorocarbures

SF₆ : Hexafluorure de soufre

UV : ultraviolets

PPB : parts per billion

Ppm : partie par million.

µm : micromètres

HAP : hydrocarbures aromatiques polycycliques

COV : composés organiques volatils

COV NM : composés organiques volatils non méthaniques

AFNOR : Agence française de normalisation

ohms.cm : l'unité de résistance électrique

MVS : Les matières volatiles en suspension

DBO : La demande biochimique en Oxygène

PCB : Polychlorobiphényles

HAP : Les hydrocarbures aromatiques polycycliques

COV : Les composés organiques volatils

MES : matière en suspension

O₂ : oxygène dissous

N- No_3^- : nitrate

N- No_2^- : nitrite

PH : potentiel hydrogène

CE : conductivité électrique

Sal : salinité

P- Po_4^{3-} : phosphate

DCO : demande chimique en oxygene

DBO₅ : demandde biologique en oxygene pendant 5 jours

T° : Température

HCl : Acide chlorhydrique

H₂SO₄ : Acide sulfurique

HNO₃ : Acide nitrique

µg/l : microgramme par litre

ONA : office national d'assainissement

Introduction

Le rejet des eaux usées chargées en substances polluantes, dans le milieu récepteur sans aucun traitement préalable est un motif de préoccupation croissant compte tenu des effets indésirables qu'elles peuvent engendrer sur l'environnement et sur la santé. Pour cette raison, les eaux usées devraient être soumises à un processus de traitement avant leur rejet dans l'environnement (Messrouk .H, 2012).

Le rejet des eaux usées domestiques peut provoquer de graves problèmes environnementaux en raison de sa forte demande en oxygène et la concentration élevée en azote et en phosphate (Daniel et al. 2001). Les systèmes classiques de traitement des effluents posent des problèmes fréquents en raison du fait qu'ils travaillent souvent au-dessus de leur capacité en raison d'une mauvaise conception ou de l'augmentation de la production. Comme solution devant les problèmes rencontrés par ces techniques de traitement on a une autre méthode qui sert à éliminer d'une manière naturelle et économique la pollution dans les eaux usées quelque soit leur origine, c'est la phytoremédiation. Cette technique très prometteuse, efficace, simple et peu coûteuse se reflète dans le traitement biologique de ces effluents.

L'objectif de ce mémoire est de mettre en évidence la capacité du *Typha latifolia* à éliminer la pollution présente dans les eaux usées urbaines de la commune de tamza, ainsi que la diminution des forte concentration de l'azote et le phosphate.

Le mémoire comporte quatre chapitres :

Les deux premiers concernent une synthèse bibliographique sur Les Différents Types De Pollution (atmosphérique, eau, sol) ainsi que les caractéristiques physico-chimiques des eaux usées. Et une description sur le procédé utilisé pour l'épuration biologique des eaux usées urbaines (la phytoremédiation).

Les deux autres chapitres permettront de donner d'une part un aperçu sur les différentes méthodes et matériels utilisés et d'une autre part l'objet du traitement par des filtres plantés de *Typha latifolia* sur l'élimination de la pollution organique et particulièrement l'azote et les phosphates. En fin, nous avons terminé le manuscrit par une discussion des principaux résultats de cette étude et une conclusion générale.

I.1. Introduction

La pollution est un problème difficile dans les pays où la population augmente rapidement. Elle est présente partout. Peu de pays développés ou non, ont suffisamment œuvré pour la maîtriser. Beaucoup n'ont pas de normes leur permettant de contenir la pollution dans des limites raisonnables, tandis que d'autres n'ont pas les moyens d'exiger l'application des normes de qualité de l'eau. Notre travail se basera sur les différentes formes de pollution qui affectent le monde et leurs caractéristiques.

I.2. Les différents types de pollution**I.2.1. Pollution atmosphérique****I.2.1.1. Définition**

«On entend par pollution de l'atmosphère, l'émission dans l'atmosphère, de gaz, des fumées ou de particules solides ou liquides, corrosifs, toxiques ou odorantes de nature à incommoder la population, à compromettre la santé ou la sécurité publique ou à nuire aux végétations, la production agricole et aux produits agro-alimentaires, à la conservation des constructions et monuments ou au caractère des sites » (**Journal Officielle, 1983**).

I.2.1.2. Sources de pollution atmosphérique**I.2.1.2.1. Les sources naturelles**

L'atmosphère renferme, à côté des éléments de base, une quantité variable de substances naturelles provenant de sources très diverses qui, dépassant un seuil, crée une source de pollution :

- Les feux des forêts, des cultures ou des prairies contribuent à des émissions importantes de noyaux de condensation, d'imbrûlés et de gaz.
- Les volcans émettent des gaz comme le dioxyde de soufre et de l'hydrogène sulfureux, et des particules des cendres en grande quantité, dont les nuages peuvent parcourir des distances considérables.
- Les embruns marins sont constitués par des aérosols renferment des cristaux de sels qui peuvent entraîner à une pollution.
- Les végétaux sont à leur tour à l'origine d'une pollution par les pollens, les spores et les champignons.
- L'homme et les animaux rejettent des quantités importantes de dioxyde de carbone et sont à l'origine d'une pollution microbienne.

- L'ozone est formé naturellement à haute altitude à partir de réaction photochimique impliquant l'oxygène de l'air, ainsi une fois transporté dans les zones rurales par le vent, l'ozone se forme en grande quantité lorsque l'insolation est très élevée. (Day, 1999)

I.2.1.2.2. Les sources dues aux activités industrielles

De nombreux types d'installations industrielles émettent cependant également des polluants dans l'atmosphère, constituent généralement un problème local à l'échelle d'une région ou d'un quartier, et planétaire à grande échelle.

I.2.1.2.2.1. Les installations fixes de combustions :

Parmi ces installations, nous pouvons citer les centrales thermiques, les foyers de combustions de l'industrie et les usines d'incinérations des ordures ménagères.

I.2.1.2.2.2. Les installations industrielles :

Très diverses, citons la sidérurgie comme la poussière métallique, la pétrochimie, le stockage des produits pétroliers, la métallurgie de l'aluminium, les industries des dérivés azotés, et les cimenteries.

I.2.1.2.2.3. Les sources de trafic :

Le trafic automobile occupe sans conteste une place déterminante. Les prestations de circulation ont en effet subi une croissance très marquée au cours des dernières décennies. Les principaux polluants sont le monoxyde de carbone (CO), les oxydes d'azote (NO_x), les composés organiques volatiles (COV), le dioxyde de soufre (SO₂).

I.2.1.3. Les différentes échelles de la pollution atmosphérique

Nous pouvons scinder la pollution atmosphérique en trois catégories :

*** Pollution de proximité et à l'échelle locale :**

Elle concerne les sources d'émission de gaz ou d'autres substances indésirables le plus souvent produites en milieu urbain (industries, chauffage, trafic...). Elle affecte en premier lieu la santé des populations par son action directe à court terme mais exerce aussi une toxicité à plus long terme pour certaines pathologies. Elle peut également procurer un gêne olfactif important et participer à la dégradation du patrimoine bâti (corrosion, salissure).

*** Pollution à l'échelle régionale :**

Elle concerne les zones situées à quelques dizaines de kilomètres (voire des centaines de kilomètres) des sources d'émission de pollution. Elle regroupe souvent sous ce terme les deux phénomènes de pollution que sont :

- Les pluies acides qui participent au dépérissement des forêts et des lacs. Elles désignent les phénomènes de retombées au sol de dépôts acides, secs et humides, qui touchent des zones étendues et éloignées des sources en raison des transformations physico-chimiques et des conditions climatiques (HCl, H₂SO₄ issu des émissions de SO₂, HNO₃ liées à celles des NO_x).
- La pollution photochimique qui désigne les mécanismes conduisant à la rupture naturelle de formation et de destruction de l'ozone troposphérique (à basse altitude) et à l'augmentation de sa concentration dans l'air.

*** Pollution planétaire :**

Qui concerne les deux problèmes identifiés :

- La diminution trou de la couche d'ozone stratosphérique due essentiellement à l'action des composés halogénés (chlore, brome, iode) libérés par les activités humaines, et la réduction du pouvoir filtrant de la couche d'ozone a des conséquences néfastes sur la santé (cancers de la peau).
- L'augmentation de l'effet de serre qui constitue un processus naturel à la vie terrestre car sans ce phénomène, la température de l'air serait inférieure de 30°C à la valeur moyenne actuelle qui est de 15°C sur notre planète. Cependant, son augmentation liée à la production excessive de certains gaz (CO, CO₂, COV) entraînera de graves changements climatiques (élévation de la température du globe et modifications climatiques lourdes de conséquences pour la vie terrestre). (Anonyme I, 1999)

I.2.1.4. Polluants atmosphériques

Trop de n'importe quelle substance au mauvais endroit ou au mauvais moment est un polluant. Plus spécifiquement, la pollution atmosphérique peut être définie comme la présence de substances dans l'atmosphère, résultant des activités synthétiques ou des processus naturels, entraînant des effets nuisibles pour l'homme et pour l'environnement. La pollution atmosphérique est un terme employé pour décrire tous les produits chimiques non désiré ou d'autres matériaux qui contaminent l'air que nous respirons ayant pour résultat la dégradation de la qualité de l'air.

I.2.1.4.1. Monoxyde de carbone :

Le monoxyde de carbone (CO) est un gaz sans couleur, inodore, toxique produit lorsque des carburants contenant du carbone sont brûlés où il y a trop peu d'oxygène. Il se forme également en raison de la brûlure des carburants à une température trop élevée. Il brûle dans l'air ou avec de l'oxygène avec une flamme bleue, et est légèrement plus léger que l'air.

En présence d'un approvisionnement adéquat en O₂, la plupart du monoxyde de carbone produit pendant la combustion est immédiatement oxydé en dioxyde de carbone (CO₂). Cependant, ce n'est pas le cas dans l'étincelle du moteur d'allumage dans les automobiles, particulièrement au ralenti et dans les conditions de décélération. Ainsi, la source principale du monoxyde de carbone dans l'atmosphère est le transport routier. De plus petites contributions viennent des processus impliquant la combustion de la matière organique, par exemple dans les centrales électriques et l'incinération des ordures. **(Buchdahl, 2000)**

*** Effet sur la santé :**

A fortes doses, il est un toxique cardio-respiratoire souvent mortel.

A faibles doses, il diminue la capacité d'oxygénation du cerveau, du cœur et des muscles. Sa nocivité est particulièrement importante chez les insuffisants coronariens et les fœtus.

*** Effet sur l'environnement :**

Le CO, au même titre que les NO_x et COV, intervient en tant que précurseur dans le processus de formation de la pollution photochimique, notamment de l'ozone troposphérique. **(BLANCHOT, 2002)**

I.2.1.4.2. Dioxyde d'azote :

L'oxyde nitrique (NO) est un gaz inodore et sans couleur qui est produit pendant la brûlure à hautes températures du carburant à l'intérieur, par exemple, des voitures et d'autres véhicules routiers, radiateurs et cuisinières. Une fois qu'il est mélangé à de l'air, il se combine rapidement avec de l'oxygène, formant du dioxyde d'azote (NO₂). La plupart du dioxyde d'azote dans l'atmosphère est formé de l'oxydation de l'oxyde nitrique (NO) de cette façon, bien qu'une partie soit émise directement de la source. Il est également présent dans la fumée de tabac. C'est un gaz d'un brun rougeâtre, ininflammable, avec une odeur discernable. Dans des concentrations importantes, il est fortement toxique, endommageant sérieusement les poumons avec un effet retardé. Le dioxyde d'azote est un oxydant fort qui réagit dans le ciel

pour former de l'acide nitrique corrosif, ainsi que des nitrates organiques toxiques. Il joue également un rôle important dans les réactions atmosphériques qui produisent de l'ozone ou le smog au niveau du sol.

*** Effet sur la santé:**

Gaz irritant pouvant pénétrer profondément dans les poumons. Il altère l'activité respiratoire et augmente les crises chez les asthmatiques.

Chez les plus jeunes, il favorise des infections microbiennes des bronches. Les effets de ce polluant ne sont pas tous identifiés. Il est un bon indicateur de la pollution automobile.

*** Effet sur l'environnement :**

Les NO_x interviennent dans le processus de formation de l'ozone dans la basse atmosphère. Ils contribuent également au phénomène des pluies acides.

Les dépôts azotés issus des émissions d'oxydes d'azote peuvent aggraver les problèmes nutritionnels des peuplements de végétaux sensibles.

Les NO_x , en présence de divers autres constituants et de rayonnement solaire énergétique ultraviolet, constituent, en tant que précurseurs, une source importante de pollution photochimique et, notamment, d'ozone troposphérique. (Blanchot, 2002)

I.2.1.4.3. L'ozone:

L'ozone (O_3) est la forme triatomique de l'oxygène moléculaire (O_2). C'est un gaz toxique bleuâtre et instable, avec une odeur piquante, trouvé naturellement dans l'atmosphère, en particulier dans la stratosphère, 19 à 30 kilomètres au-dessus de la surface de la Terre où il forme la couche d'ozone. À ces altitudes, l'ozone filtre les rayons ultraviolets (UV) entrant dans l'atmosphère. Cependant, près du niveau du sol, il peut altérer la fonction des poumons et peut causer des irritations de l'appareil respiratoire. Les asthmatiques sont connus pour adopter ces symptômes plus facilement. Les dommages irréversibles au tissu de la région respiratoire et des poumons peuvent se produire si l'ozone est présent en quantité suffisamment élevée. L'ozone au niveau du sol est formé indirectement par l'action de la lumière du soleil sur les composés organiques volatils en présence du dioxyde d'azote, et c'est pourquoi il s'agit d'un polluant secondaire. Il n'y a aucune émission synthétique directe de l'ozone à l'atmosphère. Environ 10 à 15% de l'ozone au niveau du sol est transporté vers la stratosphère. Étant donné que les concentrations en ozone sont particulièrement dépendantes de la lumière du soleil, les épisodes sont toujours susceptibles de se développer après des

périodes soutenues de chaleur et un temps calme. Une fois formé, l'ozone est nettoyé par l'oxyde nitrique (NO), habituellement présent dans des zones urbaines, à cause des vapeurs du trafic, mais moins dans la campagne. Par conséquent, l'ozone se produit habituellement dans des concentrations plus élevées en été plutôt qu'en hiver, et dans des zones rurales plutôt que des zones urbaines. Les niveaux de l'ozone à travers l'Europe sont généralement moins de 15 ppb mais peuvent être aussi élevés que 60 ppb. Pendant des épisodes photochimiques de smog, les niveaux peuvent monter à plus de 100 ppb. (Buchdahl, 2000)

*** Effet sur la santé:**

Gaz agressif, fortement irritant pour les muqueuses oculaires et respiratoires. Il pénètre aisément jusqu'aux voies respiratoires les plus fines. Il peut ainsi entraîner des irritations du nez, des yeux et de la gorge, des altérations de la fonction pulmonaire, des essoufflements et des toux. Il exacerbe les crises d'asthme.

Il ne semble pas possible de déterminer un seuil en dessous duquel ce polluant serait totalement inoffensif. De plus, les effets d'une exposition chronique sur le long terme restent encore mal connus. (Blanchot, 2002)

*** Effet sur l'environnement:**

L'ozone peut perturber l'activité photosynthétique des végétaux, altérer leur résistance, diminuer la productivité des cultures et provoquer des lésions caractéristiques.

La sensibilité varie selon les espèces : mélèzes, tabac (espèces sensibles), pin sylvestre, pin (espèces moyennement sensibles), épicéa commun, chêne pédonculé (espèces peu sensibles). Les effets chroniques se traduisent par l'apparition de petites taches nécrotiques réparties sur la surface des feuilles.

L'ozone contribue aussi avec les dépôts acides et d'autres facteurs défavorables (sécheresses, pauvreté des sols...) aux troubles forestiers et accentue le pouvoir acidifiant des NO_x et des SO₂ en accélérant leur oxydation en sulfates et nitrates.

L'ozone contribue à l'effet de serre.

Enfin, ce polluant photochimique accélère la dégradation des matériaux tel que le caoutchouc (craquelures). (Anonyme Ii, 1999/2000)

I.2.1.4.4. Les particules en suspension

Les particules en suspension sont un mélange complexe des substances organiques et inorganiques, présentes dans l'atmosphère en tant que liquides et solides. Les particules brutes peuvent être considérées comme celles avec un diamètre plus grand que 2,5 micromètres (μm), et les fines particules plus petites que 2,5 μm . Les grosses particules contiennent habituellement des matériaux provenant de la croûte terrestre et de la poussière des véhicules routiers et des industries. Les particules fines contiennent les aérosols secondairement formés, les particules de combustion et les vapeurs organiques et métalliques recondensées. Le composant acide des particules en suspension dans l'air se présente souvent en tant que fines particules. Une autre distinction qui peut être faite est de classifier les particules en suspension en tant que primaires ou secondaires, selon leur origine. Les particules en suspension primaires sont celles émises directement dans l'atmosphère, tandis que les particules en suspension secondaires sont celles constituées par des réactions impliquant d'autres polluants. Dans l'environnement urbain, la plupart des particules secondaires se produisent lorsque les sulfates et les nitrates ont formé, pendant des réactions impliquant le dioxyde de soufre, les oxydes d'azotes. (Buchdahl, 2000)

* Effet sur la santé:

Les plus grosses sont retenues par les voies aériennes supérieures. Les plus dangereuses sont les plus fines, car elles peuvent pénétrer profondément dans les poumons et transporter des composés toxiques.

Elles augmentent le risque d'infections respiratoires aiguës chez l'enfant et renforcent des sensibilités allergiques ou des pathologies préexistantes.

Une grande partie de cette pollution vient des transports. Les émissions des moteurs diesels sont particulièrement riches en particules de petites tailles. De plus, certaines particules en suspension contiennent des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) aux propriétés mutagènes et cancérogènes

* Effet sur l'environnement:

Les particules en suspension sont à l'origine de salissure sur les bâtiments. D'autre part, elles ont une influence sur la formation des nuages, des brouillards et des précipitations. Elles tendent à réduire la visibilité. Chez les végétaux, elles peuvent provoquer une réduction de la croissance et des nécroses. (Blanchot, 2002)

I.2.1.4.5. Le dioxyde de soufre :

Le dioxyde de soufre (SO₂) est un gaz sans couleur et ininflammable avec une odeur pénétrante qui irrite les yeux et les voies respiratoires. Il réagit sur la surface d'une variété de particules en suspension solides, il est soluble dans l'eau et peut être oxydé dans les gouttelettes d'eau portées par le vent. Les sources les plus communes de dioxyde de soufre incluent la combustion des combustibles fossiles, la fonte, la fabrication d'acide sulfurique, la conversion de la pulpe de bois en papier, l'incinération des ordures et la production du soufre élémentaire. Le charbon brûlant est la plus grande source synthétique de dioxyde de soufre représentant environ 50% des émissions globales annuelles, avec la brûlure de pétrole représentant 25-30% en plus. Les volcans sont la source naturelle la plus commune de dioxyde de soufre. (Buchdahl, 2000)

*** Effet sur la santé:**

Gaz irritant pouvant entraîner des crises chez les asthmatiques, augmenter les symptômes respiratoires aigus chez l'adulte et l'enfant : gêne respiratoire, accès de toux ou crises d'asthme (Blanchot, 2002)

*** Effet sur l'environnement:**

En présence d'humidité, il forme de l'acide sulfurique qui contribue au phénomène des pluies acides et à la dégradation de la pierre et des matériaux de certaines constructions.

La formation des dépôts acides (pluies acides) peut avoir des effets néfastes sur la végétation et changer les caractéristiques des sols. Lorsque ces sols sont déjà très pauvres, ils entraînent des pertes importantes de cations aggravant ainsi les difficultés d'alimentation en magnésium et en calcium des végétaux.

Des particules charbonneuses ou alumino-silicatées ayant absorbé du SO₂ peuvent se déposer sur les pierres. L'acide sulfurique formé en présence d'eau réagit avec le calcium contenu dans les particules et donne naissance à des cristaux de gypse qui par leur action mécanique et chimique participent la dégradation des monuments.(Anonyme Ii, 1999/2000)

I.2.1.4.6. Les composés organiques volatils :

Les composés organiques volatils (hydrocarbures, solvants...) proviennent notamment des sources mobiles et de procédés industriels tels que le raffinage du pétrole, le dégraissage des métaux, l'application de peintures et de vernis, l'imprimerie,... etc.

Ils constituent une famille de polluants d'une forte diversité et d'une grande complexité. Ils se différencient des hydrocarbures par le fait qu'ils comportent, en plus des atomes de carbone et d'hydrogène (constituants uniques des hydrocarbures), d'autres atomes divers et variés (chlore, oxygène, soufre, azote...). C'est pour cette raison qu'on les qualifie de composés organiques volatils non méthaniques (COV NM). (Anonyme I, 1999)

*** Effet sur la santé:**

Les effets sur la santé sont appréhendés à partir des études en milieu professionnel. Les solvants organiques peuvent être responsables de céphalées, de nausées... Les composés oxygénés sont plus ou moins réactifs (alcools). Les plus réactifs regroupent formaldéhyde, acétaldéhyde, acroléine,... responsables d'irritations des yeux, du nez, de la gorge et des voies respiratoires, de modifications pouvant aggraver l'état d'un asthmatique, voire sensibiliser les voies respiratoires (participation au développement de phénomènes allergiques).

Certains composés sont probablement cancérigènes (formaldéhyde) ou cancérigènes possibles (acétaldéhyde).

*** Effet sur l'environnement :**

Les COV au même titre que les NO_x et CO interviennent en tant que précurseurs dans le processus de formation de la pollution photochimique, notamment de l'ozone troposphérique. (Anonyme Iii, 2002)

I.2.1.4.7. Le plomb:

Il est principalement émis par le trafic automobile, d'où l'interdiction de l'essence plombée dans certains pays. Autres sources de plomb ; la fabrication de batteries électriques, la fabrication de certains verres (cristal), etc.

*** Effet sur la santé:**

Le plomb est à l'origine de perturbations neurologiques, hématologiques et rénales. Le saturnisme est une pathologie ancienne dont les symptômes sont bien corrélés au taux de plomb dans le sang. Les taux mesurés dans une population urbaine sont inférieurs à 200 ug/l chez l'homme, 150 ug/l chez la femme. Chez l'enfant, à partir de 100 ug/l (et peut-être en dessous).une altération du développement intellectuel est à craindre (mesurable par le Quotient Intellectuel). Elle est démontrée au-delà de 250 ug/l.

*** Effet sur l'environnement :**

Les effets sur l'environnement du plomb, résident essentiellement dans son accumulation au sein de la faune, de la flore et du sol. (Anonyme Iii, 2002)

I. 2.1.4.8. Autres polluants :**I. 2.1.4.8.1. CH₄ - Méthane :**

Il participe directement au phénomène d'accroissement de l'effet de serre. Les principales sources émettrices sont : l'exploitation des mines de charbon, les décharges d'ordures ménagères, l'élevage, la distribution du gaz, . . .etc.

I.2.1.4.8.2. N₂O - Protoxyde d'azote :

Il participe au phénomène de l'accroissement de l'effet de serre avec le CO₂, le CH₄, etc. Le N₂O est émis lors de la combustion des combustibles fossiles, par quelques procédés industriels, par les véhicules automobiles et par les sols (surtout ceux cultivés avec des engrais azotés). Les océans et les sols naturels contribuent aussi aux émissions.

I.2.1.4.8.3. CFC - Chlorofluorocarbures

Ils sont totalement artificiels (à l'exception du chlorure de méthyle d'origine marine). Les émissions de CFC provenaient de l'utilisation de ces produits dans les biens de consommation courante (aérosols propulseurs, mousses, extincteurs, réfrigérants, etc.). A la suite d'accords internationaux, la production de ces substances, qui participent à diminution de la couche d'ozone, est désormais très fortement réduite voire interdite pour la plupart.

I.2.1.4.8.4. HFC - Hydrofluorocarbures

Synthétisés exclusivement par voie chimique, ces composés sont aujourd'hui utilisés comme agent de propulsion des aérosols, comme fluides réfrigérants, solvants, agents d'expansion des mousses, etc.

I.2.1.4-8-5- PFC - Perfluorocarbures

Synthétisés exclusivement par voie chimique, les PFC sont largement utilisés lors des étapes de production des semi-conducteurs

I.2.1.4.8.6. SF6 - Hexafluorure de soufre :

Synthétisés exclusivement par voie chimique le SF6 est utilisé dans un grand nombre d'applications techniques. Le SF6 participe à l'effet de serre.

I.2.1.4.8.7. HF - Acide fluorhydrique :

Le fluor est surtout émis au cours de la première fusion de l'aluminium. Du fait que le fluor est présent dans de nombreux minéraux, les utilisateurs de ces minéraux sont donc des émetteurs potentiels. Les plus connus sont les briqueteries, les fabriques de fibre de verre, d'émaux, les aciéries, la sidérurgie...etc. qui épurent généralement leurs gaz avant rejet à l'atmosphère.

I.2.1.4.8.8. H₂S - Hydrogène sulfure

Très connu pour son odeur et pour sa toxicité très supérieure à SO₂, (le seuil de perception olfactive de H₂S est de 0,1 ppm), le H₂S est surtout produit par les usines de production de pâte à papier et par les unités des raffineries de pétrole.

I.2.1.4.8.9. Métaux lourds :

Il existe différentes sources de métaux lourds qui contaminent l'atmosphère :

* **L'arsenic (As)** : provient, d'une part, de traces de ce métal dans les combustibles minéraux solides ainsi que dans le fuel lourd et, d'autre part, dans certaines matières premières utilisées notamment dans des procédés comme la production de verre, de métaux non ferreux ou la métallurgie des ferreux.

* **Le cadmium (Cd)** : pour sa part est émis par la production de zinc et l'incinération de déchets essentiellement.

* **Le chrome (Cr)** : provient essentiellement de la production de verre, de ciment, de la métallurgie des ferreux et des fonderies.

* **Le cuivre (Cu)** : provient majoritairement de l'usure des caténaires induites par le trafic ferroviaire. Le traitement des déchets et la combustion constituent à des degrés divers les principales sources émettrices de cuivre.

* **Le mercure (Hg)** : est émis en quantité faible, mais toujours trop importante, par la combustion du charbon, du pétrole, la production de chlore, mais aussi par l'incinération de déchets ménagers, hospitaliers et industriels.

* **Le nickel (Ni)** : est émis essentiellement par la combustion du fuel lourd qui contient de traces de ce métal.

* **Le Sélénium (Se)** : provient essentiellement de la production de verre. L'utilisation du fuel lourd contribue également aux émissions du fait des traces de ce métal qu'il contient.

* **Le Zinc (Zn)** : provient de la combustion du charbon et du fuel lourd mais aussi de certains procédés industriels appartenant à la métallurgie des ferreux et non ferreux ainsi qu'à l'incinération des déchets. (Citepa, 2002)

I.2.2. Pollution des eaux

I.2.2.1. Définition

Le petit Larousse définit la pollution comme «une dégradation du milieu naturel par des substances chimiques, des déchets industriels ». On peut aussi la présenter ainsi :

« Modification physico-chimique ou biologique d'un écosystème par l'introduction d'un élément extérieur qui crée des nuisances voir un danger pour le monde du vivant. » La pollution est la conséquence de l'introduction de matières, en quantité suffisamment importante pour perturber son fonctionnement habituel à court, moyen, ou long terme. La plus part du temps elle est due à l'activité de l'homme mais pas toujours (Claude, 2010)

Pour cerner correctement la notion de pollution par un effluent, il faut intégrer plusieurs facteurs qui caractérisent l'eau usée et le site où elle est rejetée :

- La nature des produits incriminés,
- Leurs concentrations (leurs quantités) dans l'eau usée,
- La durée pendant laquelle elle est rejetée,
- La sensibilité du milieu récepteur, c'est à dire, de l'écosystème qui recevra ces produits !

A quantité égale tous les produits n'ont pas le même impact polluant. Il peut être plus ou moins important en fonction de leur nature. Ceux qui ont un impact important à faible concentration sont dits «toxiques » parce que, présents en faible quantité, ils vont modifier de manière importante et dans un sens négatif, l'équilibre de l'écosystème. Cela peut être le cas de métaux lourds, de cyanures, d'arsenic ou des molécules qui sont utilisées pour les traitements phytosanitaires. L'introduction d'un polluant dans un écosystème peut modifier l'équilibre d'une communauté microbienne et permettre le développement de bactéries pathogènes qui peuvent être à l'origine de maladies chez l'homme, les animaux ou les plantes... Lorsqu'une eau usée est récupérée dans un réseau de tuyau par exemple, elles sont disponibles pour être traitées en un point précis. C'est ce que l'on appelle la pollution localisée. Par contre quand des produits chimiques sont répartis dans les champs (comme les engrais, ou des produits phytosanitaires), seulement une partie de ce qui a été répandu sera absorbés par les plantes ou transformés par les micro-organismes du sol.

Les restes qui ne seront pas consommés peuvent être «polluants » car ils seront emportés par les pluies et vont modifier l'équilibre de l'écosystème naturel en d'autres endroits. L'homme ne peut à posteriori rien faire pour éliminer cette pollution, parce qu'elle est répartie sur de grandes surfaces (ou dans de grands volumes d'eau). On la qualifiera de pollution diffuse. On conclut, La pollution de l'eau est une altération qui rend son utilisation dangereuse et perturbe l'écosystème aquatique. Elle peut concerner les eaux superficielles (rivières, plans d'eau) et/ou les eaux souterraines. **(René, 2010)**

I.2.2.2. Les différentes sources de pollution

I.2.2.2.1. La pollution chimique

La pollution chimique peut être accidentelle ou diffuse. Les eaux usées industrielles contiennent également de l'azote, notamment les eaux rejetées par les fabricants d'engrais ou d'explosifs, les industries de traitements des métaux et les industries agro-alimentaires. Les industries rejettent ces pollutions qui entraînent une détérioration de l'environnement. Une présence insuffisante de stations d'épuration.

I.2.2.2.2. Les décharges sauvages

Les décharges sauvages (huile de vidange, batteries...) et tout ce que l'on jette dans la nature sans vraiment y prêter attention, représentent une source de pollution qui fait parfois beaucoup de dégâts....

I.2.2.2.3. La pollution domestique

Proviens des utilisations quotidiennes de l'eau à la maison, l'eau des toilettes comme l'eau des lavages environ 150 litres par jour et par habitant, est une source de pollution : organique (graisses) ; chimique (poudres à laver, détergents...). La pollution domestique est représentée par les eaux usées domestiques, l'eau de pluie (qui lave les rues), les commerces. Elle est responsable de l'altération des conditions de transparence et d'oxygénation de l'eau, ainsi que du développement de l'eutrophisation.

I.2.2.2.4. La pollution agricole

Les matières organiques : les déjections animales, issues de l'élevage, contiennent des matières organiques, matières azotées et phosphore pouvant poser des problèmes de pollution des eaux superficielles et souterraines dans les zones d'élevage intensif. Les rejets de bactéries dans l'environnement sont limités par les pratiques agricoles qui consistent à stocker le lisier dans des fosses. Lorsque les conditions d'épandage sont respectées, ces rejets sont bien absorbés par l'environnement.

Toutefois, certains peuvent perdurer des semaines, voire des mois dans l'environnement et en zone d'élevage intensif. Le risque de détecter des microorganismes pathogènes dans les rivières peut alors être important. Les engrais chimiques (nitrates et phosphates) altèrent la qualité des nappes souterraines qu'ils atteignent par infiltration des eaux. Les pesticides d'origine agricole les plus souvent quantifiés sont les herbicides. Bien que moins fréquente que celle des herbicides, une présence significative d'insecticides et de fongicides utilisés en traitement de grandes cultures est mise en évidence dans l'eau des rivières. Les herbicides et les insecticides s'accumulent dans les sols et les nappes phréatiques.

I.2.2.2.5. La pollution accidentelle

- entreposer des produits chimiques solubles
- déverser des produits polluants lors d'accidents de la circulation maritime
- dispenser des gaz ou des liquides toxiques par les usines
- les incendies. (James D, & All 1974)

I.2.2.3. Nature de la pollution

Diverses formes de pollution affectent les ressources en eau. La pollution « thermique » est la conséquence du déversement dans le milieu aquatique « fleuves, eau littorales) de quantités considérables d'eau utilisées pour le refroidissement, surtout lors de la production d'énergie électrique par les centrales thermiques ou nucléaires. L'élévation excessive de la température de l'eau fluviale, surtout en période d'étiage, peut modifier l'équilibre biologique des eaux au regard des espèces piscicoles et faciliter le développement d'amibes libres, pathogènes pour les baigneurs. Il est très difficile de changer complètement les effets de la pollution de l'eau. Les processus naturels qui nettoient l'eau peuvent prendre des années, des décennies ou même des siècles. Les processus technologiques coûteux nécessitent des années avant d'enlever complètement tous les polluants nuisibles dans l'eau. Il y a 2 aspects, lors de contamination, qui est important de traiter. Premièrement, la source de la pollution de l'eau doit être enlevée pour que la contamination supplémentaire ne se produise pas. Nombre de micropolluants parviennent dans les eaux par le biais des effluents de stations d'épuration. Ils constituent alors une charge permanente dans l'environnement et risquent (lorsque l'effluent n'est pas suffisamment dilué) de porter atteinte aux organismes aquatiques et dès lors à tout l'écosystème. Pour réduire l'apport de micropolluants, des mesures s'imposent à différents niveaux, mais seule une optimisation ciblée des stations d'épuration permettra de réduire sensiblement l'apport d'une vaste palette de substances. (Goel, P.K.2006)

I.2.2.4. Degré de la pollution

Influence de la pollution sur la vie aquatique

Dans l'eau d'un lac, il y a des algues, des végétaux aquatiques des insectes, du plancton, des micro-organismes, de petits et de gros poissons... et des gaz dissous dans l'eau (comme le gaz carbonique et l'oxygène). Ce petit monde s'organise pour vivre tranquillement (figure I.1). Cela signifie que :

- L'oxygène diffuse à travers l'interface air-eau pour se dissoudre dans l'eau.
- Les végétaux aquatiques, les algues, récupèrent le gaz carbonique, les sels minéraux de l'eau, utilisent la lumière pour la photosynthèse et rejettent de l'oxygène dans l'eau.
- Les poissons consomment l'oxygène qu'il y a dans l'eau et mangent les plantes, les algues, les insectes, et les gros poissons ... mangent les petits poissons.
- Les micro-organismes (des bactéries, par exemple) utilisent la matière organique et minérale et l'oxygène présent dans l'eau pour se développer et se multiplier. Comme cette matière organique est présente en faible quantité, ils ne se multiplient que très lentement et donc, ne consomment que peu d'oxygène ... ce qui en laissera au poisson pour respirer.
- La lumière qui traverse le volume d'eau va servir aux algues, aux plantes aquatiques pour produire de l'oxygène qui servira lui aussi, aux poissons, aux bactéries...

Et tout cela vit dans un certain équilibre et tout s'arrange tranquillement, et tout va pour le mieux dans le meilleur des mondes...

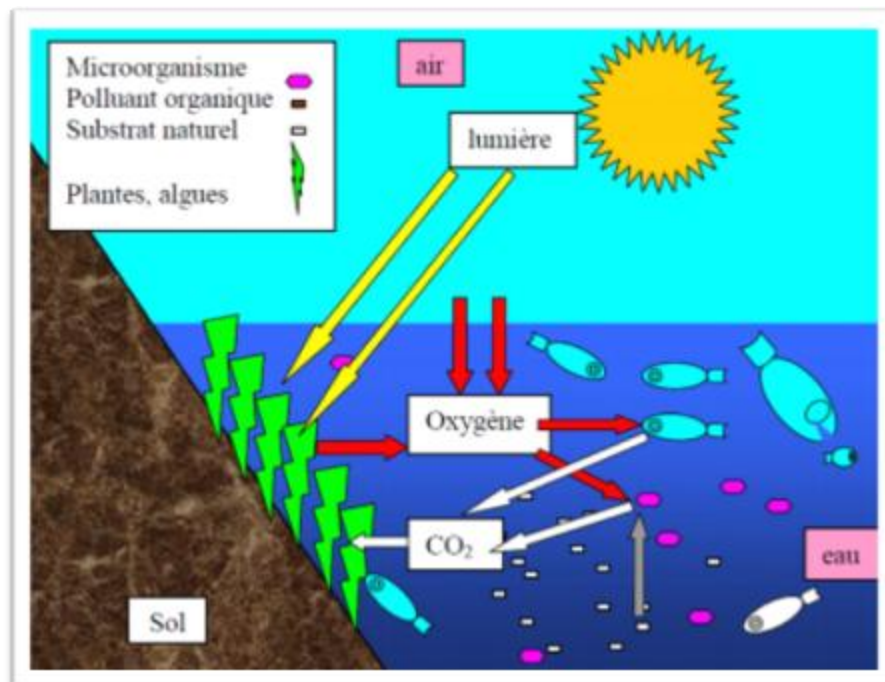


Figure I.1 : exemple de transfert de matière et d'énergie dans un écosystème lacustre. (René, 2010)

Le problème va arriver quand on va introduire, en quantité significative, de la matière organique ou minérale, dans ce lac. Elle va entraîner une modification des caractéristiques de cet équilibre même si elle est d'origine naturelle. Pourquoi ? Cette matière est polluante car elle devient un nouveau substrat pour les microorganismes qui vont la consommer très rapidement (figure I.2). En même temps, ils vont, consommer plus d'oxygène (qui est dissous dans l'eau). Ils peuvent consommer tellement d'oxygène qu'il n'y en aura plus assez pour les poissons. Ils vont mourir par asphyxie.

La prolifération des micro-organismes va rendre l'eau plus opaque et va empêcher la lumière d'atteindre les algues et diminuer ainsi la production d'oxygène dans l'eau ce qui va amplifier l'asphyxie des poissons.

Alors quel sont les principaux facteurs introduits qui peuvent modifier l'équilibre d'un écosystème ?

- Les matières organiques ou minérales, d'origines naturelles ou non.
- Des produits dit «toxiques » car de petites concentrations ont de grands impacts,
- Des particules ou des colorants qui vont empêcher la lumière d'atteindre les algues,
- Une température élevée ou très basse qui va détruire les être vivants qui ne sont pas adapté.
- L'introduction d'un organisme prédateur peut générer un nouvel écosystème (poisson vorace par exemple, ou une algue qui s'installe à la place de toutes les autres)

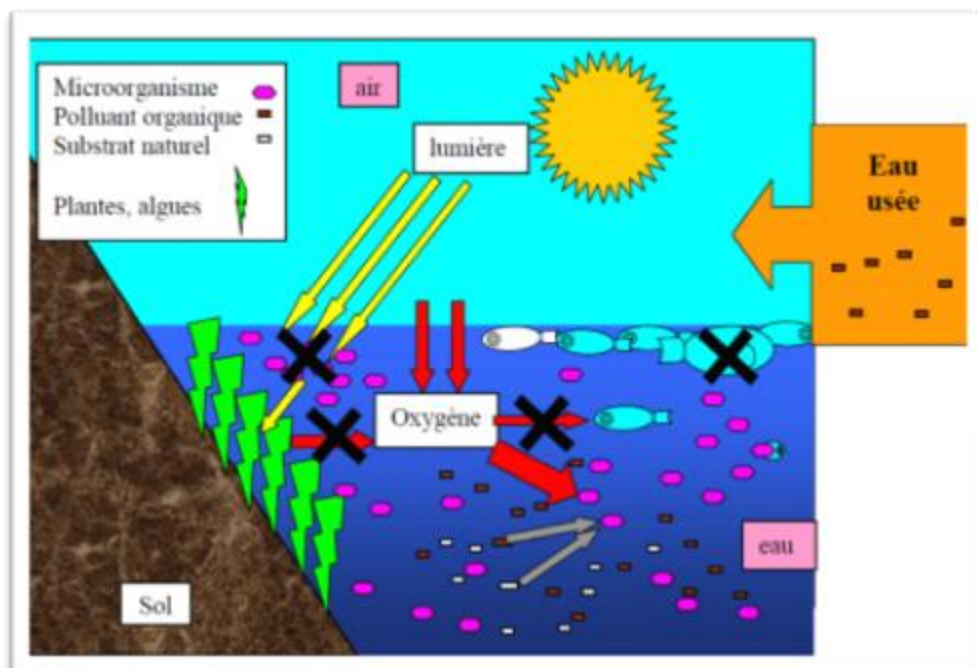


Figure I.2 : Exemple d'impact de l'introduction d'un polluant dans un lac.(René, 2010)

L'effet de ces pollutions conduit à la modification, voir plus souvent, à une réduction importante de la bio-diversité.

Un produit naturel, composé de matière facilement consommable par les microorganismes (comme le sucre par exemple) peut donc devenir un polluant si elle est rejetée en grande quantité dans le milieu naturel. (René, 2010)

* Phénomène de l'eutrophisation

L'eutrophisation est un processus naturel et très lent, par lequel les plans d'eau reçoivent une grande quantité d'éléments nutritifs (notamment du phosphore et de l'azote), ce qui stimule la croissance des algues et des plantes aquatiques. Ce processus, se déroule normalement sur une période allant de plusieurs milliers à quelques dizaines de milliers d'années. Cependant, les activités humaines l'ont accéléré dans de nombreux lacs en augmentant la quantité d'éléments nutritifs qui leur parviennent, provoquant des changements dans l'équilibre de ces écosystèmes aquatiques.

Au delà de la conséquence sur les concentrations en oxygène dans l'eau, la pollution organique a pour effet majeur d'eutrophiser les milieux aquatiques, c'est-à-dire de les enrichir en nutriments (azote, phosphore). Ces conditions favorisent le développement surabondant de certaines espèces d'algues, modifiant complètement le fonctionnement de l'écosystème. On parle de dystrophisation. Ces déséquilibres provoquent une diminution de la biodiversité et entraînent un risque de production de toxines par certaines algues.

L'eutrophisation des eaux entraîne le développement surabondant de certaines algues.



Figure I.3 : Rivière en eutrophie (c Ph.Calandre)

D'après Smith v,1999 Le phénomène d'eutrophisation se manifeste par une augmentation de la biomasse phytoplanctonique dans la colonne d'eau qui, en se décomposant peut entraîner une désoxygénation des eaux.

Parmi cette biomasse algale se développent des algues phytoplanctoniques, en majorité non siliceuses, donc certaines émettent des toxines qui peuvent être dangereuses pour la faune marine (poissons, coquillages,...) et pour les consommateurs. (Smith V, & All 1999)

I.2.2.5. Les principaux paramètres physico- chimiques de pollution

I.2.2.5.1. La Température

La connaissance de la température est essentielle pour les réactions physico-chimiques et biologiques régies par leurs caractéristiques thermodynamiques et cinétiques. A titre d'exemple, la concentration à saturation de l'oxygène dissous, pH, la conductivité,... sont dépendants de la température de même que les processus de biodégradation carbonée, de nitrification ou plus généralement de production biologique. (Olivier, 1995). La température de l'eau est un paramètre de confort pour les usagers. Elle permet également de corriger les paramètres d'analyse dont les valeurs sont liées à la température (conductivité notamment) (Meseck, 2002).

I.2.2.5.2. La Conductivité électrique

La conductivité mesure la capacité de l'eau à courir entre deux électrodes. La plupart des matières dissoutes dans l'eau se trouvent sous forme d'ions chargés électriquement. La mesure de la conductivité permet donc d'apprécier la quantité de sels dissous dans l'eau (Urios, 2005). La conductivité est également fonction de la température de l'eau : elle est plus importante lorsque la température augmente. Les résultats de mesure doivent donc être présentés en termes de conductivité équivalente à 20 ou 25 °C. La conductivité est généralement mesurée en micro-Siemens par cm (Us/cm), approximativement la valeur en us/cm correspond à la salinité en mg/l (tableau I.1). On utilise également la résistivité, inverse de la conductivité, mesurée en ohms.cm. (Rodier, 1984).

Tableau I.1: Classification des eaux d'après leurs conductivités (AFNOR)

50 à 400 Us/cm	Qualité excellente
400 à 750 Us/cm	Bonne qualité
750 à 1500 Us/cm	Qualité médiocre mais eau utilisable
>1500 Us/cm	Minéralisation excessive

I.2.2.5.3. La Turbidité

La mesure de la turbidité permet de préciser les informations visuelles sur l'eau. La turbidité traduit la présence de particules en suspension dans l'eau (débris organiques, argiles, organismes microscopiques...).

Cependant une turbidité forte peut permettre à des microorganismes de se fixer sur des particules en suspension. La turbidité se mesure sur le terrain à l'aide d'un turbidimètre (Bontoux, 1993).

I.2.2.5.4. La Couleur

La coloration d'une eau peut être soit d'origine naturelle (éléments métalliques, matières humiques, micro-organismes liés à un épisode d'eutrophisation,...), soit associée à sa pollution (composés organiques colorés). La coloration d'une eau est donc très souvent synonyme de la présence de composés dissous. La mesure normalisée de la coloration (AFNOR) a fait l'objet d'une révision récente. Elle s'effectue soit par comparaison avec une gamme de concentration comme de solutions colorées, soit par mesure spectrophotométrie (Olivier, 1995).

I.2.2.5.5. Le pH

Le pH (potentiel Hydrogène) mesure la concentration en ions H^+ de l'eau. Il traduit ainsi la balance entre acide et base sur une échelle de 0 à 14,7 étant le pH de neutralité. Ce paramètre caractérise un grand nombre d'équilibre physico-chimique et dépend de facteurs multiples, dont l'origine de l'eau (Tableau I.2). Le pH doit être impérativement mesuré sur le terrain à l'aide d'un pH-mètre ou par colorimétrie (Olivier, 1995).

Tableau I.2 : Classification des eaux d'après leur pH (AFNOR).

pH<5	Acidité forte présence d'acides minéraux ou organique dans les eaux naturelles
pH=7	pH neutre
7<pH<8	Neutralité approchée majorité de eaux de surface
5,5<pH<8	Majorité des eaux souterraines
pH=8	Alcalinité forte, évaporation intense

I.2.2.5.6. L'oxygène dissous

L'oxygène dissous est un composé essentiel de l'eau, car il permet la vie de la faune et il conditionne les réactions biologiques qui ont lieu dans les écosystèmes aquatiques. Dans le domaine de l'épuration, il est indispensable pour la dégradation de l'oxygène dans l'eau dépend de différents facteurs dont la température, la pression et la force ionique du milieu. La solubilité relativement faible de l'oxygène dans l'eau dépend de la température (5mg/l à 0°C et 7mg/l à 35°C). (Meseck, 2002)

I.2.2.5.7. Les matières en suspension(M.E.S)

La pollution en M.E.S. des eaux usées urbaines est à l'origine de nombreux problèmes au niveau de la station d'épuration, comme ceux liés au dépôt des matières dans les bassins ou les canalisations, à leur capacité d'adsorption physico-chimique (métaux, microorganismes...) Ou aux phénomènes de détérioration des matériels (abrasion). Cette pollution représente l'essentiel de la charge des rejets urbains des réseaux unitaires par temps de pluie. Dans le milieu récepteur, les MES peuvent entraîner des perturbations de l'écosystème par une diminution de la clarté de l'eau, limitant la photosynthèse végétale par le dépôt, l'envasement, et l'asphyxie des poissons par colmatage des branchies. Les dépôts dans les zones calmes sont susceptibles d'entraîner le développement de bactéries anaérobies, avec la conséquence habituelle : fermentation, production de composés acides et d'odeur. (Franck Rejets, 2000).

I.2.2.5.7.1. Les matières volatiles en suspension(MVS)

Elles sont constituées par la partie organique des MES, elles sont mesurées par calcination à 600°C en deux heures et présentent en moyenne 70% des MES.

I.2.2.5.7.2. Les matières minérales (M.M)

Elles représentent la fraction minérale des MES. C'est la différence entre les matières en suspension et matières volatiles en suspension, Elles représentent par conséquent le résidu de la calcination.

I.2.2.5.8. La demande biochimique en Oxygène(DBO)

La DBO, ou Demande Biochimique en Oxygène correspond à la quantité d'oxygène nécessaire aux micro-organismes aérobies de l'eau pour oxyder les matières Organiques biodégradables d'une eau (toute matière organique biodégradable polluante entraîne une consommation de l'oxygène) au cours des procédés d'autoépuration .

La matière organique est présente sous forme dissoute et sous forme solide. Sous forme solide elle constitue une partie des matières en suspension. Elle est composée d'atomes de carbone associés à d'autres éléments, principalement : l'hydrogène, l'oxygène, et l'azote.

Les composés organiques peuvent être naturels ou synthétiques. Ils se décomposent par voie biologique suivant des cinétiques variables. Les produits de dégradation génèrent des composés intermédiaires éventuellement toxiques. Au stade ultime de décomposition, la matière organique est transformée en nutriments : azote, phosphore, gaz carbonique... Ils sont conventionnellement classés en trois grandes familles : les glucides, les lipides et les protéines. La mesure la plus couramment réalisée est celle de la DBO5, retenue par la direction Européenne du 21 mai 1991 (Norme AFNOR NF T.90.103) (Tableau I.3). La DBO5 correspond à la demande biochimique en oxygène après 5 jours d'incubation de l'échantillon à une température de 20°C. (Ouali, 2001).

Tableau I.3: Echelle de valeurs de DBO5(AFNOR).

DBO5(mg/l d'O2)	Situation
<1	Eau naturelle pure et vive
1<C<3	Rivière légèrement polluée
100<C<400	Egout
20<C<400	Rejet station d'épuration efficace

I.2.2.5.9. Demande chimique en oxygène (DCO)

La demande chimique en oxygène traduit la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder chimiquement les matières organiques contenant dans l'effluent. La mesure de la DCO se fait par l'aide d'un oxydant énergétique bichromate de potassium, en milieu acide, et à chaud pendant deux heures. Elle est représentative de la majeure partie des composés organiques ainsi que les sels minéraux oxydable. Elle donne une idée de la charge polluante. Il convient toute fois de rester prudent quant à son interprétation car certains composés ne sont pas oxydés lors de l'essai normalisé (hydrocarbure par faunique et cycle par faunique, sels ammoniacaux, urée par exemple...). La pollution oxydable est essentiellement due aux rejets industriels et urbains. Les rejets diffus peuvent également constituer une part importante de cette pollution.

I.2.2.6. L'impact des eaux usées sur l'environnement et la santé

I.2.2.6.1. Sur la nutrition minérale des plantes

L'épandage des boues résiduelles, ou l'irrigation par les eaux usées provoque notamment une augmentation de la concentration des sols en éléments minéraux nutritifs essentiels pour le développement des végétaux (l'azote, le phosphore et le potassium).et par conséquent, ils favorisent une croissance importante des végétaux. (**Cherak, 1999**).

I.2.2.6.2. Sur la croissance des végétaux

Les apports répétés des eaux usées sur le sol agricole plusieurs fois provoquent une augmentation de la concentration des sols en éléments nutritifs et par conséquent, ils favorisent une croissance importante des végétaux. (**Cherak, 1999**).

I.2.2.6.3. Sur la santé humaine

Les maladies transportées ou occasionnées par les eaux usées, comme la typhoïde, Le choléra, jusqu'à la fin du siècle dernière, responsables de graves épidémies qui dévastaient des régions entières. Cependant, les maladies hydriques ce sont encore parmi les trois grandes causes de morbidité et de mortalité dans les pays sous développés (**Asano, 1998**).Les voies d'exposition sont multiples :

- Contact avec la terre et les poussières soulevées par le vent ou par manipulation (en particulier pour des enfants en bas âge).
- Ingestion accidentelle directe ou par aérodistorsion (voie orale) d'eau usée.
- Contact cutané des eaux usées.
- Consommation des végétaux cultivés sur les terres d'épandages susceptibles d'être contaminés

I.2.3. Pollution des sols

I.2.3.1. Définition

La pollution et la contamination sont deux expressions couramment employées pour désigner l'accumulation anormale et exogène, généralement due à une activité humaine, d'éléments ou de composés minéraux, organiques ou d'agents pathogènes dans un milieu donné dont la qualité se trouve affectée. (**Chassin P & all, 1996**)

Une substance toxique désigne une substance naturelle ou de synthèse, minérale ou organique, présentant une nocivité pour les organismes vivants, pouvant être absorbée par voie foliaire ou racinaire chez les plantes, par inhalation, ingestion ou contact chez les animaux, elle provoque une intoxication des organismes affectés en perturbant une fonction vitale pouvant entraîner la mort. (**Ramade R, 2000**)

I.2.3.2. Formes de pollution

On distingue deux types de pollution des sols (**Jeannot, R & all, 2000**)

- La pollution localisée : Elle se distingue par la présence ponctuelle dans les sols de substances dangereuses: déversements, fuites ou dépôt de déchets.
- La pollution diffuse : Elle implique des polluants à faible concentration sur de grandes surfaces, ils proviennent généralement d'épandages de produits: engrais ou pesticides, retombées atmosphériques.

Pour chacun de ces types, on distingue deux origines de pollution:

- La pollution accidentelle : Déversement ponctuel et momentané de substances polluantes.
- La pollution chronique : survenant sur de longues durées, telles que les fuites sur des conduites enterrées, les lixiviats issus de dépôts de déchets.

I.2.3.3. Micropolluants des sols

I.2.3.3.1. Micropolluants inorganiques

Il s'agit d'un ensemble d'éléments ou de composés dont l'accumulation est responsable d'une pollution du sol (**Chassin P & all, 1996**). Généralement ils sont non biodégradables, accumulatifs et toxiques quand ils sont présents en grande quantité (**Boucheseiche C & all 2002**)

Les micropolluants minéraux métalliques et non métalliques les plus rencontrés sont le cadmium, le chrome, le cuivre, le mercure, le nickel, le plomb, le sélénium, le zinc, l'arsenic, le molybdène, le cobalt, le bore et le thallium. (**Mérian E, 1991**)

Les micropolluants minéraux sont présents naturellement à des concentrations généralement basses dans les sols. Ils proviennent en grande partie de l'altération de la roche mère du sous sol (**Jeannot, R & all, 2000**). Les activités anthropiques peuvent conduire à une augmentation de ces concentrations naturelles. L'accumulation des métaux lourds dans l'environnement est liée à leur utilisation comme matières premières pour de nombreux produits industriels ou comme catalyseurs chimiques (**Crosinier J, 1999**). On les trouve également dans des produits tels que les pesticides ou les engrais qui sont distribués sur une large surface.

Ils sont aussi apportés sous forme de déchets urbains ou industriels, solides, liquides ou gazeux. (Eshighi Malayri B, 1995)

I.2.3.3.2. Micropolluants organiques

Ce sont en grande majorité des produits de synthèse issus de l'activité anthropique (Boucheseiche C & all, 2002). Ils proviennent principalement de trois ensembles d'activités industrielles (production d'énergie, métallurgie, industries chimiques...), urbains (transport, traitement des déchets,...) et agricoles (utilisation de produits phytosanitaires).(Chu W & all, 2005)

I.2.3.3.2.1. Polychlorobiphényles (PCB)

Ce sont des substances chlorées très stables, largement utilisées dans la production des condensateurs, transformateurs, fluides hydrauliques, lubrifiants, pesticides (De S, Pramanik S & all, 2004), encres d'imprimeries et dans les peintures (Barriuso E & all, 1996). Ils peuvent être dégradés à haute température (1200°C), leur combustion peut générer des dioxines et des furanes, substances cancérigènes et mutagènes. Les PCB sont insolubles dans l'eau (De S, Pramanik S & all, 2004) et ont une forte affinité pour les matières en suspension et les lipides. Ils s'accumulent donc dans le milieu naturel et se bioaccumulent fortement dans la chaîne alimentaire, par exemple dans les graisses des poissons et d'autres organismes vivants.(Boucheseiche C & all, 2002)

I.2.3.3.2.2. Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)

Les HAP résultent de la combustion incomplète de la matière organique. Ils sont peu solubles dans l'eau et s'adsorbent fortement sur les particules organiques du sol, ce qui diminue considérablement leur biodisponibilité. Ils se bioaccumulent aussi dans les graisses, notamment chez les poissons et les mollusques. (Boucheseiche C & all, 2002)

I.2.3.3.2.3. Les composés organiques volatils (COV)

Le terme de composés organiques volatils (COV) englobe un grand nombre de composés appartenant à différentes familles chimiques: alcanes, alcanes substitués, alcènes, alcools, composés aromatiques (benzène), esters, cétones. Les COV font l'objet de nombreuses utilisations en tant que solvants, dégraissants, dissolvants, conservateurs, agents de nettoyage. Ils entrent donc, seuls ou en mélange, dans un grand nombre de procédés d'industries manufacturières utilisatrices de solvants, d'application et de fabrication de peinture, de préparation de caoutchouc, les imprimeries, les papeteries, la pharmacie, la parfumerie, les industries agro-alimentaires. (Lalanne F, 2006)

I.2.3.3.2.4. Phénols et dérivés

Les phénols sont des composés aromatiques hydroxylés comprenant le phénol et ses dérivés tels que les chlorophénols (mono-, di-, tri-, tétra-, penta-), les nitrophenols, les crésols, les diméthylphénols (**Jeannot, R & all, 2000**). Ils peuvent être naturellement présents dans l'eau et le sol, en tant que produit de la décomposition des végétaux ainsi que des déchets végétaux et animaux (**Dobbins, D.C & all 1987**). Les phénols sont utilisés dans l'industrie des matières plastiques, dans l'industrie pharmaceutique ainsi que dans la fabrication de nombreux produits : adhésifs, explosifs, coke, engrais, gaz d'éclairage, peintures, caoutchouc, articles renfermant de l'amiante, agents de préservation du bois et des textiles, médicaments, préparations pharmaceutiques, parfums. Ils servent aussi à la fabrication de détergents, de colorants, de pesticides (notamment les chlorophénols) (**Boucheseiche C & all, 2002**). Les phénols proviennent également de la dégradation des insecticides organophosphorés et des herbicides chlorophénoxyacides. (**Jeannot, R & all, 2000.**)

Les chlorophénols sont des phénols chlorés renfermant un nombre variable de chlore dans leur molécule, depuis le monochlorophénol jusqu'au pentachlorophénol (**Ramade R, 2000**). Dans l'environnement, les chlorophénols proviennent de sources naturelles et anthropiques.

Les chlorophénols d'origine naturelle résultent de la chloration de la matière organique naturelle, de la dégradation des acides fluviqes chlorés naturels et de l'activité biologique dans certains types de sol par les champignons, les lichens et les insectes (**Matafonova G, & all, 2006**). Les sources anthropiques sont principalement d'origines industrielle, agricole et domestique (**ATSDR, 1999**). Les chlorophénols sont extensivement utilisés comme préservateurs des bois, insecticides, fongicides, herbicides (**Atuanya E. I. & all, 2003**). Ils peuvent aussi être générés comme sous produits dans la production industrielle et résulter de la combustion de déchets organiques (**Puhatika J. A. & all, 1992**).

I.2.3.3.2.5. Pesticides

Couramment appelés produits phytosanitaires. Il s'agit généralement de produits de synthèse qui sont volontairement introduits par l'homme dans l'environnement soit pour protéger les récoltes et les denrées stockées, soit pour protéger les différents secteurs de l'agriculture intensive, soit encore pour lutter contre les vecteurs de maladies (**Fdil F, 2004**). Actuellement le nombre de ces composés est considérable, pour cela les producteurs et utilisateurs les classent en fonction de leur cible biologique (**Kankou M, 2004**):

- * Les insecticides contre les insectes.
- * Les herbicides contre les mauvaises herbes.
- * Les fongicides contre les champignons.

Les herbicides représentent la classe économiquement et quantitativement la plus importante. De plus, les herbicides sont davantage persistants dans les sols que les insecticides et les fongicides et génèrent des produits de dégradation stables qui peuvent également présenter une activité biocide (**Jeannot, R& all, 2000**). Une fois dans l'environnement, les pesticides peuvent être transformés en un grand nombre de produits de dégradation, communément définis comme métabolites. Plusieurs études ont rapporté la présence de ces derniers dans les eaux souterraines. Le 2,4-D est l'un des herbicides les plus utilisés pour contrôler les mauvaises herbes. Une fois dans le sol, le 2,4-D est métabolisé en 2,4-dichlorophénol, métabolite récalcitrant, souvent détecté dans les eaux souterraines à un taux supérieur à 3,3 µg/L (**Fava L& all, 2005**).

I.3. Conclusion

Dans ce Chapitre nous avons essayé de présenter les différents types de pollution (atmosphérique, eau, sol), ainsi que leur effet sur l'environnement et sur la santé humaine. À fin de déterminer les principaux paramètres physico-chimiques de la pollution des eaux. Les paramètres sont : Température, pH, conductivité électrique, DBO₅, DCO, oxygène dissous, matière en suspension, turbidité, couleur.

II.1.Introduction

Les traitements des eaux usées sont les processus fait dans le but de diminuer la quantité des polluants pour atteindre la norme de rejet des effluents dans le milieu naturel ou de réutiliser l'eau. Le traitement des eaux usées a pour but de diminuer suffisamment la quantité de substances polluantes des eaux usées et de restituer au milieu naturel une eau qui est loin d'être pure, mais qui apporte le moindre danger (**Rakotoarison, 2008**). «*Phyto*» signifie en grec «*plante*». Le mot *phyto-épuration* veut donc dire épuration avec l'aide de plantes.

La phytoépuration est un système de traitements des eaux usées en utilisant le pouvoir épurateur des plantes. Ces plantes sont des microphytes et/ou des macrophytes. Elle est souvent appelée lagunage à microphytes ou lagunage aéré et lagunage à macrophytes ou filtres plantés.

II.2. la phytoremédiation

II.2.1. Définition

Le terme « phytoépuration » n'est utilisé que depuis très peu de temps. Il est en effet le résultat de la diversification des techniques de « marais artificiels », systèmes plantés d'espèces aquatiques pour le traitement des eaux usées. Ces techniques sont communément appelées « constructed-wetlands » en anglais.

C'est un système innovant, particulièrement efficace, qui utilise le pouvoir épurateur des plantes aquatiques et qui offre une alternative écologique, économique, durable et esthétique au système classique. Le principe est simple : les bactéries aérobies (qui ont besoin d'oxygène et ne dégagent pas de mauvaises odeurs) transforment les matières organiques en matières minérales assimilables par les plantes. En retour, les plantes aquatiques fournissent de l'oxygène par leurs racines aux bactéries. (**Radoux, M., 1989 et Poulet. J.b, & al, 2004**).

II.2.2. Historique de la Phytoremédiation

La technologie de traitement des eaux usées en utilisant des plantes est apparue en Europe d'Ouest basée sur une recherche de SEIDEL qui a commencé durant les années soixante, et par KICKUTH à la fin des années soixante-dix et dernièrement durant les années quatre-vingt.

Des travaux avancés ont commencé aux Etats Unies au début des années quatre-vingt (1980) avec la recherche de WOLVERTON, GERBERGET et al.

Le système développé par SEIDEL comprend des séries de lits composés de sable ou gravier supportant une végétation aquatique immergée tel que la massette « Typha », le jonc, et le phragmite qui a été le plus communément utilisé, et dans la majorité des cas le plan d'écoulement est vertical. (EPA, 1993). Dans le nord d'Amérique, des observations de la capacité assimilatives des terres émergées naturellement mène à l'expérimentation avec différents modèles de marécages construits durant les années soixante-dix. (EPA, 1993.)

Commençant en 1985, un nombre de systèmes de « lits de phragmite » a été construit en Angleterre basés sur les concepts de KICKUTH, mais plusieurs cas utilisaient le gravier au lieu des sols cohésifs dus à la conductivité hydraulique (élevée) (EPA, 1993). La technologie des filtres plantés de macrophytes pour le traitement des eaux usées domestiques est une technique au développement récent. Apparue en France dans les années quatre-vingt cette technique de traitement a vu son développement s'accroître depuis 1997. La forte demande actuelle pour ce type de station d'épuration de la part des élus est réelle. Il s'agit d'une technologie fiable, simple d'exploitation, facilitant grandement la gestion des boues d'épuration et qui, de surcroît, est bien acceptée par les habitants en raison de sa bonne aptitude à l'intégration paysagère. Ainsi, elle s'avère fortement recommandée pour les petites collectivités et les pays à faibles ressources financières (Brix, 1993).

II.2.3. Les différents modes de phytoremédiation

La phytoremédiation repose essentiellement sur les plantes, les micro-organismes rhizosphériques associés et leurs interactions avec le sol. Selon le polluant et l'espèce végétale, plusieurs techniques de phytoremédiation peuvent être développées (figure II.1). (Alain Vavasseur & all, 2008)

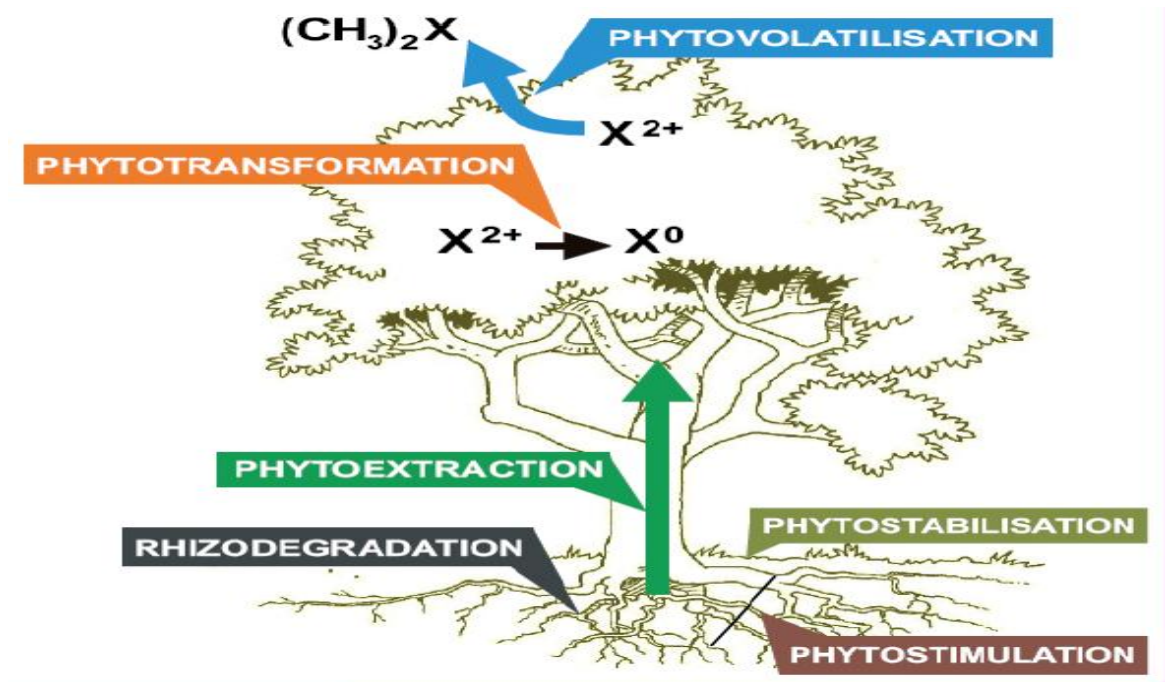


Figure II.1: Les différentes formes de phytoremédiation.
 (X indique un élément, qui peut se trouver à différents états d'oxydo-réduction. X⁰ : état fondamental métallique (le mercure, Hg⁰, peut être volatilisé).

- **Rhizodégradation** : il s'agit de la dégradation enzymatique de polluants organiques en molécules moins ou non toxiques par les micro-organismes de la rhizosphère. Ce processus est activé par la production d'exsudats racinaires qui vont favoriser les activités microbiennes (phytostimulation).

- **Phyto transformation** (ou phytodégradation) : c'est l'équivalent du processus décrit ci-dessus, au niveau des parties racinaires et aériennes des plantes. Certaines plantes produisent des enzymes (déhalogénase, oxygénase,...) qui catalysent la transformation des substances toxiques absorbées.

- **Phytostabilisation** : le développement du système racinaire des végétaux et le couvert végétal permettent de réduire la mobilité des contaminants en limitant l'érosion et en diminuant les écoulements souterrains vers l'aquifère. Les parois des cellules racinaires sont, de plus, des sites privilégiés d'adsorption de cations métalliques ce qui peut permettre la séquestration de métaux.

Phyto- ou Rhizofiltration : des plantes aquatiques peuvent être utilisées pour dépolluer les eaux, essentiellement de surface (**Pierre Richaud & all, 2008**)

- **Phytoextraction** : les végétaux absorbent, par leur système racinaire, les éléments nutritifs qui leur sont indispensables et les transfèrent en grande partie vers les parties aériennes.

Ils font de même avec les éléments toxiques lorsque ceux-ci sont biodisponibles. La masse des parties aériennes des plantes étant la plupart du temps supérieure à celle du système racinaire, la phytoextraction est le processus permettant de pousser le plus loin une solution de phytoremédiation. Certaines plantes s'avèrent naturellement hyper accumulatrices pour des éléments (accumulation > 1 mg/g de matière sèche). Si les plantes sont récoltées et incinérées il est possible de récupérer dans les cendres les métaux intéressants pour les valoriser (*phytomining*).

• **Phytovolatilisation** : certains contaminants phytoextraits peuvent être transformés en leur(s) forme(s) volatile(s) et évaporés dans l'atmosphère *via* les stomates des feuilles. Ce mode de phytoremédiation n'est pas toujours satisfaisant, les formes volatiles des éléments étant la plupart du temps très toxiques. Il est toutefois utilisé dans le cas du sélénium sans conséquence pour l'environnement. (Julie Misson-Pons & all, 2008)

II.2.4. Les types de phytoremédiation

II.2.4.1. la phytoremédiation à microphytes

Elle consiste à créer un bassin de faible profondeur où l'eau va stagner pendant une période plus ou moins longue. Les microphytes, qui sont des algues planctoniques, se développent dans ce bassin. Elles consomment la pollution azotée et phosphatée dans les eaux usées. Le lagunage à microphytes est souvent le premier bassin d'une station de lagunage car ce traitement est insuffisant et nécessite un lagunage à macrophyte. Les rôles des microorganismes dans l'épuration des eaux usées sont :

- la photosynthèse produite par les algues augmente la teneur en oxygène de l'eau qui affecte à leur tour les éléments nutritifs et les réactions ;
- elles se nourrissent des effluents et dégradent la matière organique qui devient dès lors assimilable par les plantes.

Il y a donc une étroite coopération entre les plantes et les micro-organismes.

II.2.4.2. la phytoremédiation à macrophytes

Ce type de traitement nécessite des plantes macrophytes originaires des zones humides naturelles. Cette filière d'épuration s'appuie sur le pouvoir épuratrices des végétaux hydrophytes ou héliophytes. Les eaux usées séjournent simplement dans des séries de bassins à ciel ouvert peuplés de ces végétaux. Les rôles des végétaux macroscopiques dans l'épuration des eaux usées sont importants dans le traitement des eaux usées :

- * Elles sont le support des bactéries: les plantes épuratrices abritent une flore bactérienne importante ;
- * Elles récupèrent les matières minérales dégradées par les bactéries ;
- * Elles stabilisent les substrats, tout en améliorant leur perméabilité et limite la vitesse des flux d'eau, ce qui permet à la matière en suspension, le carbone, les éléments nutritifs et les oligo-éléments d'intégrer les tissus végétaux ;
- * Elles produisent de l'humus au moment de leur décomposition ;
- * Elles aèrent le substrat en apportant de l'oxygène entre leur tige et les racines.

Elles améliorent aussi considérablement la valeur esthétique du site. Toutes les espèces des zones humides ne sont pas appropriées pour le traitement de l'eau.

II.2.5.Principales caractéristiques de l'épuration par lits plantés

Les lits plantés de macrophytes peuvent assurer un traitement satisfaisant pour un investissement moyen, ses résultats épuratoires dépendent de plusieurs paramètres, parmi lesquels on peut citer :

- L'aération du substrat : qui se présente comme le plus important de ces paramètres car il est limitant. En effet, l'élimination des matières organiques et la nitrification sont deux réactions qui demandent beaucoup d'oxygène.
- La température : Une température élevée augmente l'activité des micro-organismes dégradeurs. La solubilité de l'oxygène dans l'eau est amoindrie et sa consommation par les bactéries est accrue.
- La composition du substrat : Un sol fin permet un plus grand contact de l'effluent avec les micro-organismes fixés sur la surface des granulats et un temps de rétention plus important. Un sol grossier permet quant à lui une meilleure aération du substrat et permet d'éviter au maximum le colmatage des pores ou de la surface du substrat. Une nouvelle méthode consiste à superposer deux couches distinctes du même type et ainsi tirer profit de toute la granulométrie du substrat, tout en améliorant l'apport d'air par convection dans le substrat.
- Le type de macrophytes : L'efficacité des macrophytes incombe aux racines qui ont un excellent support pour les micro-organismes et qui par leur développement permettent un brassage et un certain décolmatage du substrat. **(Poulet et al, 2003)**.
- Aussi la présence des macrophytes assure une protection contre le gel dans la mesure où les massifs en hiver sont couverts par la végétation. **(Agence de l'eau, 2007)**.

II.2.6. Filtres plantés de roseaux

Les filtres plantés de roseaux ou rhizosphères sont des excavations étanches au sol remplies de couches successives de gravier ou de sables de granulométrie variable, et leur fonctionnement alterne des phases d'alimentation et de repos.

a) Filtres plantés de roseaux à écoulement vertical

Le traitement est effectué sur plusieurs étages en série (en général deux) constitués en général de trois surfaces élémentaires en parallèle et fonctionnant en alternance. Où ils sont alimentés par bâchées et par immersion temporaire de la surface permettent un renouvellement de l'atmosphère du massif par convection; ils fonctionnent ainsi en conditions insaturées, aérobies (Armstrong, 1988).

La caractéristique principale de ce type d'épuration réside dans le fait que les filtres du premier étage de traitement, dont le massif actif est constitué de graviers fins, peuvent être alimentés directement avec les eaux usées brutes dégrillées (sans décantation préalable). Cela évite à la commune de gérer les boues primaires qui présentent une stabilisation imparfaite. Chaque filtre du premier étage reçoit la totalité de la charge pendant la phase d'alimentation, d'une durée de 3 à 4 jours, avant d'être mis au repos pendant une période double.

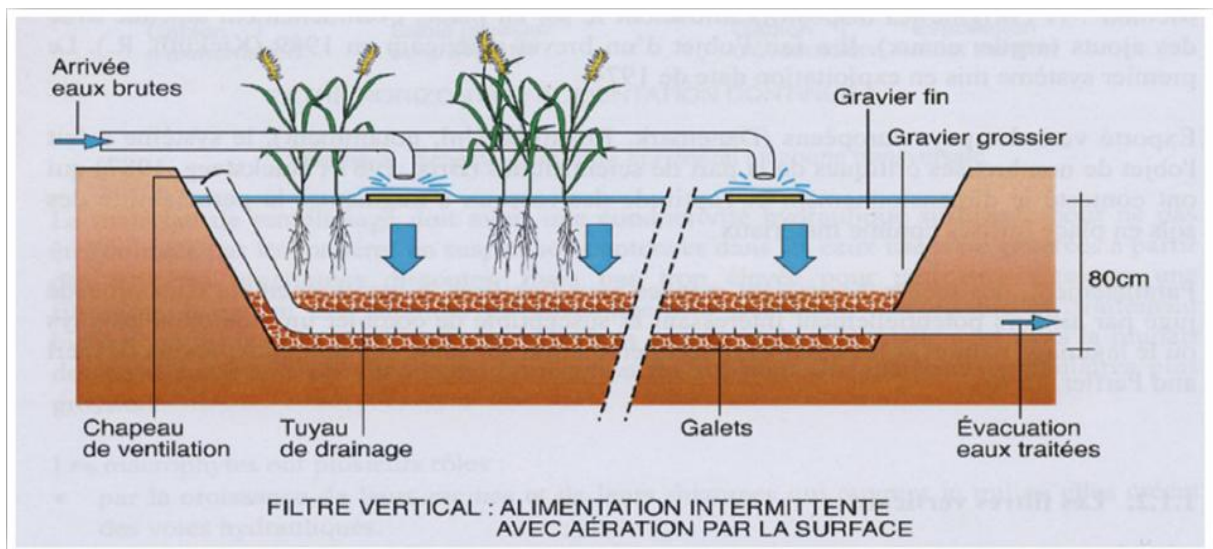


Figure II.2: Schéma d'un filtre planté de roseaux à écoulement vertical (Stoter Denis, 2009)

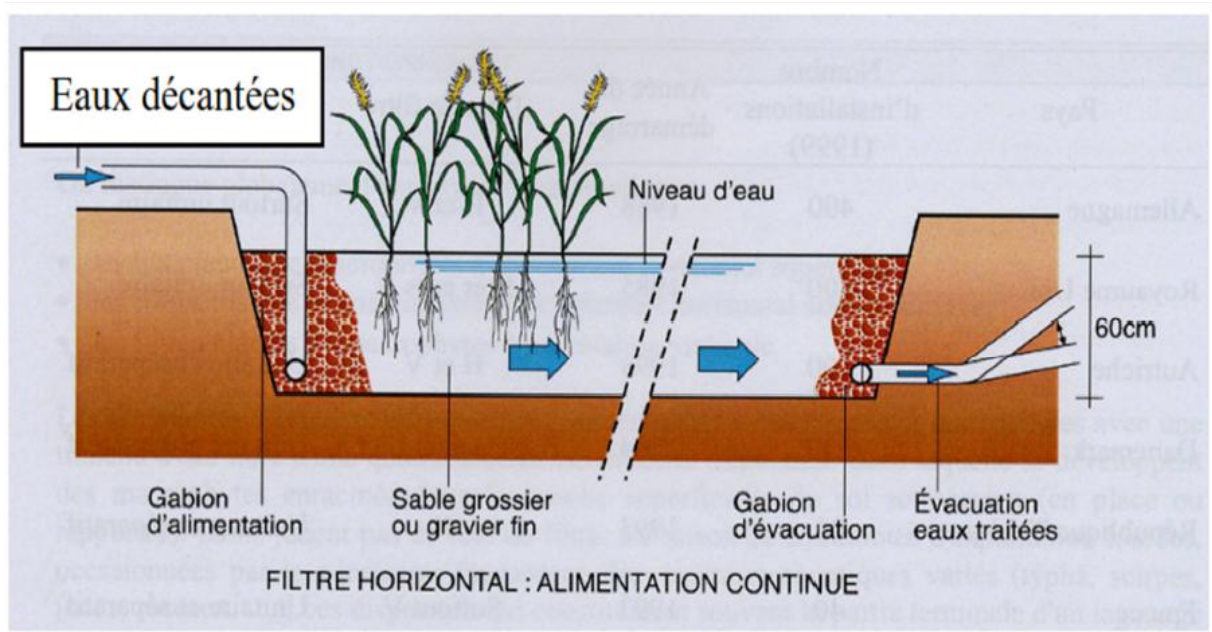
Ces phases d'alimentation et de repos sont fondamentales pour contrôler la croissance de la biomasse au sein des filtres, maintenir des conditions aérobies à l'intérieur des filtres et minéraliser le dépôt de matières organiques issu de la rétention des matières en suspension à la surface (figure II.2). L'effluent est dirigé vers un deuxième étage de traitement pour affiner l'épuration particulièrement en ce qui concerne le traitement de l'azote. Les processus épuratoires sont assurés par des microorganismes fixés, présents dans le massif filtrant mais aussi dans la couche superficielle de boues retenues sur la plage d'infiltration. Et le massif filtrant dans le deuxième étage de traitement est majoritairement constitué de sables, complète le traitement de la fraction carbonée de la matière organique, essentiellement dissoute, ainsi que de l'oxydation des composés azotés. L'oxydation de la matière organique s'accompagne d'un développement bactérien qui doit être régulé pour éviter un colmatage biologique interne.

L'autorégulation de la biomasse est obtenue grâce à la mise en place de plusieurs massifs indépendants alimentés en alternance. Pendant les phases de repos, le développement des bactéries, placées en disette, est réduit par la prédation et la dessiccation.

b) Filtres plantés de roseaux à écoulement horizontal

Ce procédé épuratoire consiste à infiltrer des eaux usées prétraitées dans un milieu granulaire insaturé sur lequel est fixée la biomasse épuratoire, ce prétraitement a pour rôle la rétention des graisses et la décantation des matières en suspension contenues dans l'effluent, et ce dernier est réparti sur toute la largeur et la hauteur du lit par un système répartiteur, il s'écoule ensuite en déplacement horizontal (figure II.3).

L'évacuation est obtenue par un drain, au fond, enterré dans une tranchée de pierres drainantes. Ce tuyau est relié à un siphon, pour régler la hauteur de surverse pour assurer la saturation de l'alimentation, et le niveau d'eau doit être maintenu à 5 cm sous la surface du matériau. Comme il n'y a pas d'eau libre, il n'y a pas de risque de prolifération d'insectes. 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.



*Figure II.3: Schéma d'un filtre planté de roseaux à écoulement horizontal.
(Stoter. Denis, 2009)*

La pénurie en oxygène limite la dégradation de la pollution carbonée et azotée, l'oxydation du carbone organique et de l'ammonium et par voie de conséquence limite la croissance bactérienne hétérotrophe et autotrophe. La filtration sur sable en milieu insaturé permet principalement une oxydation de la matière organique; une nitrification de l'azote ammoniacal et une réduction des germes pathogènes.

II.2.7. Les systèmes hybrides

Les systèmes hybrides sont en fait l'association en séries de filtres verticaux et de filtres horizontaux. L'intérêt d'une telle association est d'obtenir une bonne nitrification dans les filtres verticaux qui sont bien oxygénés, mais aussi une dénitrification dans les filtres d'anoxie nécessaires à cette réaction. Les rendements de la dénitrification ne sont pas très élevés car les bactéries dénitrifiantes ont besoin de matières organiques pour se développer et dénitrifier correctement. Or, en sortie des filtres verticaux, la majeure partie de la matière organique a été dégradée, elle n'est donc plus disponible pour les bactéries.

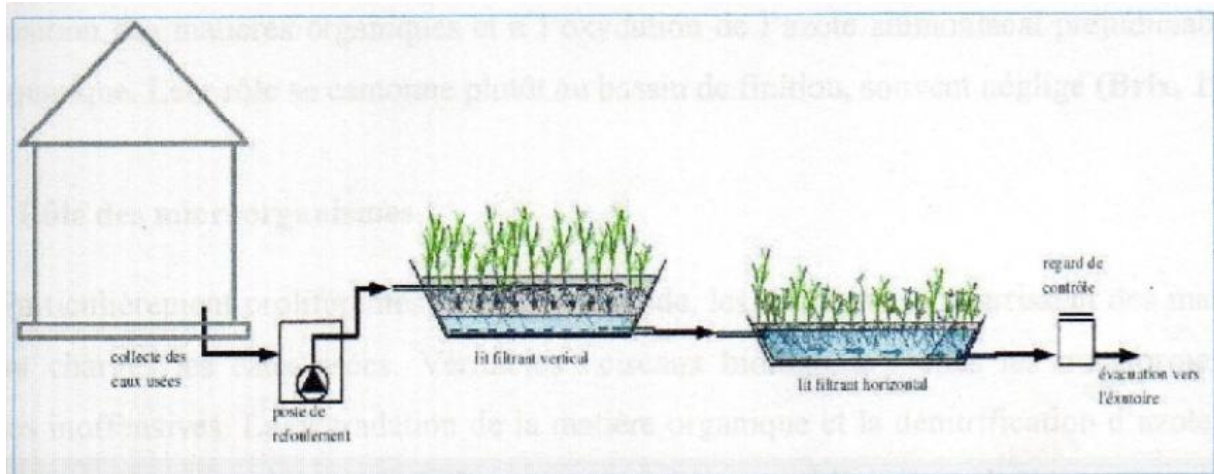


Figure II.4 : coupe transversale schématique d'un filtre à écoulement hybride (Hendrik, 2008).

II.2.8. Les mécanismes d'élimination et les performances épuratoires

Les mécanismes d'élimination sont régis par les processus physiques, chimiques, physicochimiques ou encore biologiques.

II.2.8.1. Les matières en suspension :

Bien que les filtres plantés de roseaux soient encore considérés comme des «boîtes noires», les auteurs s'accordent généralement sur le fait que les matières polluantes, dissoutes ou particulières, sont d'abord adsorbées ou filtrées puis dégradées de façon biologique pendant la phase de repos. (Henrichs & al, 2007)

Les particules les plus grossières sont piégées à la surface du filtre au cours de l'alimentation, puis minéralisées pendant la période de temps sec grâce aux microorganismes présents à la surface du filtre et dans la couche de sédimentation déjà formée. Lorsqu'elles sont très organiques, les longues chaînes carbonées qui les composent (ex : amidon) favorisent la formation d'une couche de colmatage, qui peut entraver la circulation de l'influent dans le massif en diminuant le volume des pores (Zhao & al, 2009). Dans le système allemand, ce phénomène est cependant réduit par l'utilisation d'un réservoir d'eaux pluviales en amont du filtre. Par ailleurs, les macrophytes ont un rôle de décolmatation physique de par leurs mouvements latéraux. Ils contribuent ainsi à fissurer cette couche de dépôt.

Les particules plus fines passent au travers du filtre ou sont retenues par les pores du matériau filtrant. Elles contribuent alors à en diminuer la porosité et la conductivité hydraulique. Elles peuvent également subir une adsorption, qui peut être biotique ou abiotique.

Les rendements sur les MES des filtres plantés sont constamment élevés et augmentent avec la charge appliquée. Concernant la DCO particulière sont généralement très élevés (>90%). (Dittmer, 2006).

II.2.8.2. La matière organique

La matière organique est dégradée par des bactéries hétérotrophes aérobies ou anaérobies. L'enlèvement de la DBO5 est assuré par une biodégradation à partir des micro-organismes aérobies ou anaérobies.

- La *dégradation aérobie* transforme la matière organique en biomasse bactérienne et en éléments minéraux simples :

Matière organique + bactéries + O₂ ---- > nouvelles cellules + CO₂ + H₂O

Les nouvelles cellules ainsi formées seront dégradées à leur tour.

- La *dégradation anaérobie* est limitée par la présence d'oxygène. C'est pourquoi elle peut avoir lieu dans les filtres horizontaux, saturés en eau en permanence et où des zones dépourvues d'oxygène existent à proximité de zones aérobies, et très peu dans les filtres verticaux. (Wozniak, 2008). Les plantes et le sol n'ont pas d'influence directe sur l'enlèvement de la DBO5 mais indirecte en favorisant la croissance des micro-organismes. De plus, les plantes fournissent une proportion de l'oxygène nécessaire. (Malick Gaye, ed)

II.2.8.3. Les métaux

Dans les eaux usées, on trouve les métaux sous forme soluble ou particulaire. Les formes particulières sont retenues par *filtration*. Les formes solubles sont éliminées, par principalement deux mécanismes. D'une part, les métaux *précipitent* sous forme d'oxydes et de sulfides métalliques grâce à, respectivement, des bactéries métallo-oxydantes dans les zones aérobies et des bactéries sulfato-réductrices dans les zones anaérobies. Ils sont ensuite retenus dans la matrice du filtre. D'autre part, à l'interface racine/sédiment, on rencontre de forts gradients rédox qui provoquent la précipitation d'hydroxydes ferriques complexes. Ceux-ci s'accumulent dans la rhizosphère formant une sorte de gaine autour des racines. Elle constitue une barrière efficace contre l'assimilation végétale et favorise la *co-précipitation* avec d'autres métaux lourds dans la plaque d'hydroxyde ferrique. (Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse, 1999)

II.3. Conclusion

La technologie des filtres plantés de macrophytes pour le traitement des eaux usées domestiques est une technique au développement récent. La forte demande actuelle pour ce type de stations d'épuration de la part des élus est réelle. Il s'agit d'une technologie fiable, simple d'exploitation, facilitant grandement la gestion des boues d'épuration et qui, de surcroît, est bien acceptée par les habitants en raison de sa bonne aptitude à l'intégration paysagère. La conception de filtres plantés de macrophytes possède réellement de nombreux avantages; c'est une technique simple, économique, efficace, fiable, adaptable au lieu. Les plantes vont soit absorber le contaminant pour le métaboliser ou le stocker, soit réduire voire empêcher la libération du contaminant dans d'autres compartiments de l'environnement. Le plus souvent, les composés organiques ou non peuvent être dégradés et métabolisés pour la croissance de la plante.

III.1. Introduction

L'épuration des eaux usées doit actuellement franchir une étape importante du fait des récentes directives environnementales de plus en plus rigoureuses. Pour répondre aux besoins des petites collectivités ayant des contraintes techniques et financières leur interdisant les systèmes techniques d'épuration classiques, il y a l'apparition des systèmes d'épuration rustiques, techniques alternatives aux procédés artificiels, tels que le lagunage, l'épandage ou encore les lits filtrants plantés de macrophytes. (Poulet, et all, 2003)

Le but de ce volet de notre mémoire consiste en l'analyse expérimentale du pouvoir épurateur Des roseaux, dans le but de traiter les eaux usées urbaines des la ville de Khenchela situé dans une région semi-arides et particulièrement celles de la commune de Tamza. Dans ce cadre, un choix s'est penché sur le *Typha latifolia*

III.2. Aperçu général sur la zone d'étude

III.2.1. Situation géographique

La commune de Tamza , issue de la commune mère El Hamma lors du découpage administratif , a été créée en 1984.

Elle est attachée administrativement à la Daira d'El Hamma et se situe géographiquement au milieu du territoire juridique de la wilaya de Khenchela.

Elle est limitée :

Au nord : par les communes de Kais et d'El Hamma.

Au nord est : par la commune de N'sigha

Au nord Est : par la commune de Bouhmama

A l'Ouest : par la commune de Chélia

Au sud : par la commune de Babar et de Khierane

Tableau III.1: Caractéristiques géographiques de la commune de Tamza

Coordonnées géographiques Tamza	Latitude: 35.3167 , Longitude: 6.83333 35° 19' 0" Nord, 6° 49' 60" Est
Superficie Tamza	38 700 hectares 387,00 km ² (149,42 sq mi)
Altitude Tamza	1 259 m
Climat Tamza	Climat semi-aride sec et froid (Classification de Köppen: BSk)



Figure III.1 : Localisation de la commune de Tamza dans la wilaya de Khenchela



Figure III.2 : Localisation de la commune de Tamza dans l'Algérie

III.3. le point d'étude

La station d'épuration (STEP) de la commune de Tamza est notre point d'étude et de prélèvement des eaux usées pour les tests expérimentaux. Ce site collecte les rejets domestiques de toute la zone de la commune de Tamza (figure III.3).



Figure III.3 : Rejet des collectivités de la commune de Tamza

III.3.1. Donnée générale de la station

Tableau III.2: Donnée générale de la station de Tamza

Nom de la station de lagunage	Tamza	
Commune	Tamza	
Wilaya	KHENCHELA	
Localités concernées par le traitement	Tamza	
Superficie de l'assiette	3,31 hectares	
Milieu récepteur	Oued TAMAGRA	
Procédé de traitement	Lagunage naturel	
Capacité de la station	2100EQH	600m ³ /j
Nature des eaux brutes	très faible charge	
Le dispositif d'assainissement de la ville est de type	unitaire	
Alimentation en eau usée	oui	
Impact de réalisation de la station	Protection du barrage : Babar	
Groupement de réalisation	SARL SORETED-Khenchela	
- Génie civil		
- Equipements		
Date de mise en service de la station	13 Juillet 2010	
Date de transfert de la station à l'ONA	03/02/2013	

(ONA KHENCHELA 2016)

III.3.2. Bases de dimensionnement des ouvrages

III.3.2.1. Charge hydraulique

Tableau III.3: charge hydraulique de la station de Tamza

Paramètres	Unités	
Equivalent. habitant	EQ.H	2100
Volume journalier	m ³ /h	25,33
Débit moyen de temps sec	m ³ /h	25
Débit de pointe temps sec	m ³ /h	18,2
Débit maximal admis en temps de pluie	m ³ /h	/

(ONA KHENCHELA 2016)

III.3.2.2. Charge polluante

Tableau III.4: charge polluante de la station de Tamza

Paramètres	Unités	
Charge journalière en DCO	Kg/j	353,4
Charge journalière en DBO ₅	Kg/j	98,37
Charge journalière en MES	Kg/j	210
Charge en azote ammoniacal (N- NH ₄)	Kg/j	/

(ONA KHENCHELA 2016)

III.3.3. Qualité des eaux épurées rejetés

Tableau III.5: Qualité des eaux épurées rejetés de la station de Tamza

Paramètres	Concentration en mg/l	Rendement minimum d'élimination en %
DBO ₅	≤ 68	85≥
DCO	≤ 146	82≥
MES	≤ 139	72≥

(ONA KHENCHELA 2016)

III.4. choix des plantes

Généralement le choix des végétaux à planter s'appuie sur un certain nombre de critères importants : adaptation aux conditions climatiques locales, durée du cycle de végétation, vitesse de croissance, facilité d'exportation de la biomasse, et l'abondance sans aucun entretien particulier. Notre travail est basé essentiellement sur l'effet de *Typha Latifolia* sur la phyto-épuration.

Le *Typha* utilisé est une plante endémique vivace de 1 à 2 mètres, à tige robuste ; feuilles largement linéaires (6 à 18 mm.), planes, glaucescentes, dépassant la tige ; épis proches ou à peine espacés et qui colonise les marées, étranges, rivière dans presque toute la France, l'Europe, l'Asie, l'Afrique et l'Amérique boréale.



Figure III.4 : le Typha Latifolia

III.4.1. Définition et caractéristiques :

Classification :

Règne : Plantae

Sous-règne : Tracheobionta

Division : Magnoliophyta

Classe : Liliopsida

Sous-classe : Commelinidae

Ordre : Typhales

Famille : Typhaceae

Genre : Typha

Espèce : *Typha Latifolia*

Typha Latifolia forme des grosses touffes très denses. Les tiges florifères (portant les fleurs) sont un peu plus courtes que les feuilles. Les feuilles sont larges de 2 à 4 cm, longues parfois de plus de 2 m. Elles engainent la base des tiges et sont alternes sur deux rangs. Les fleurs sont formées de 2 épis longs chacun de 10 à 20 cm et non espacés. Au-dessus, l'épi mâle est de couleur paille ; en dessous l'épi femelle est cylindrique et de couleur fauve. Les fruits sont des akènes Le rhizome immergé forme des racines rampantes qui permettent à cette plante de coloniser rapidement de grandes surfaces. Taille de 1 à 3 m

Description Hors-sol :

Massette à larges feuilles est une plante aquatique ou semi-aquatique émergente (**T. M. Barkley & all, 1986**). Les plantes sont normalement de 3 à 10 pieds (1-3 mètres) de hauteur et largement clonale (**Figure III.5**) À feuilles larges tiges de quenouilles sont robustes, de forme cylindrique, et non ramifiés. Longueur de la tige de floraison est généralement égale ou légèrement supérieure à la longueur des feuilles (**Mason, Herbert L, 1957**). Les feuilles sont épaisses, linéaire, plat, et de mesurer de 6 à 29 mm de large.



Figure III.5 : *Typha Latifolia* Hors-sol

Description souterraine :

Floras de toute la plage de larges quenouilles de décrire ses rhizomes aussi dur, gros (**Figure III.6**) est étendu. Rhizomes poussent à l'horizontale juste en dessous de la surface du sol. Dans une étude, les rhizomes latéraux auraient été jusqu'à 28 pouces (70 cm) de long, avec un diamètre de 0,2 à 1,2 pouces (0,5-3 cm). Peu profondes racines fibreuses sont fixées sur les rhizomes (**Bare. Janet E, 1979**)



Figure III.6 : Les racines de *Typha Latifolia* souterraine

III.5. les analyses effectuées

Les analyses physico chimiques des eaux usées (T, PH, MES, DBO₅, DCO, N-NO₂⁻, N-NO₃⁻, P-PO₄³⁻, sal, CE, O₂) ont été réalisées au laboratoire. Dans ces essais on a effectué deux analyses : une analyse des eaux brutes avant traitement (tableau III.6, tableau III.7, tableau III.8) (ONA KHENCHELA 2016) et une autre analyse des eaux récupérées après épuration à la sortie du bassin. Les matériel utilisé est cités dans (le tableau III.9).

Tableau III.6: Caractéristique physico chimiques des eaux usées de la commune de Tamza (échantillon 1 : le 19-01-2016)

paramètres	brute	unité
MES	335	Mg/l
DCO	940	Mg/l
DBO ₅	360	Mg/l
P-PO ₄ ³⁻	12.42	Mg/l
N-NO ₂ ⁻	14.32	Mg/l
N-NO ₃ ⁻	33.10	Mg/l
pH	8.04	/
O ₂	0.82	Mg/l
SAL	1.15	Mg/l
CE	1880	μs/cm
T°	10.7	C°

Tableau III.7: Caractéristique physico chimiques des eaux usées de la commune de Tamza (échantillon 2 : le 02-02-2016)

paramètres	brute	unité
MES	325	Mg/l
DCO	610	Mg/l
DBO ₅	410	Mg/l
P-PO ₄ ³⁻	42.3	Mg/l
N-NO ₂ ⁻	110	Mg/l
N-NO ₃ ⁻	63.2	Mg/l
PH	8.08	/
O ₂	0.51	Mg/l
SAL	1.07	Mg/l
CE	1862	μs/cm
T°	10.9	C°

Tableau III.8: Caractéristique physico chimiques des eaux usées de la commune de Tamza (échantillon 3 : le 17-03-2016)

paramètres	brute	unité
MES	273	Mg/l
DCO	641	Mg/l
DBO ₅	420	Mg/l
P-PO ₄ ³⁻	38	Mg/l
N-NO ₂ ⁻	106.2	Mg/l
N-NO ₃ ⁻	52	Mg/l
PH	8.14	/
O ₂	0.23	Mg/l
SAL	1.02	Mg/l
CE	1687	μs/cm
T°	11.8	C°

Tableau III.9: Matériels utilisées pour analyse physico chimique

analyse	Matériels utilisés
Ph	Multi-paramètre
T°	
CE	
O ₂	
salinité	
MES	spectrophotomètre
N-NO ₃ ⁻	
P-PO ₄ ³⁻	
DCO	colorimètre Oxytop / 6 postes wtw
N-NO ₂ ⁻	
DBO ₅	



Figure III.7 : Multi-paramètre



Figure III.8 : spectrophotomètre



Figure III.9 : colorimètre



Figure III.10 : Oxytop / 6 postes wtw

III.6. Conclusion

Dans ce Chapitre nous avons essayé de présenter la zone d'étude ainsi que le matériel et les méthodes utilisés, à fin de déterminer les paramètres physico-chimiques des eaux usées avant le traitement. Les paramètres testés sont : Température, pH, conductivité électrique, nitrite, nitrate, phosphate, DBO₅, DCO, oxygène dissous, salinité, matière en suspension.

IV.1. Introduction

Après la détermination des caractéristiques de la station et la qualité des eaux usées testées. Notre travail est porté sur le calcul des rendements épuratoires de plante, dont l'objectif est d'observer les capacités de rétention des bassins à filtre planté. Une comparaison est également proposée en évaluant la qualité des eaux usées à l'entrée et à la sortie des filtres Dans trois périodes différentes.

IV.2. Caractéristiques physico-chimiques des eaux usées :

Les analyses physico-chimiques des eaux usées, ont été réalisées aux laboratoires d'office national d'assainissement (ONA). Les caractéristiques physico-chimiques de ces eaux sont regroupées dans : le Tableau IV.1, le Tableau IV.2, le Tableau IV.3.

Tableau IV.1: caractéristiques physico-chimiques des eaux usées (Echantillon 1)

paramètres	Eau brute	Eau traitée
MES mg/l	335	109
DCO mg/l	940	145
DBO ₅ mg/l	360	40
P-PO ₄ ³⁻ mg/l	12.42	10.54
N-NO ₂ ⁻ mg/l	14.32	11.51
N-NO ₃ ⁻ mg/l	33.10	21.8
PH	8.04	8.01
O ₂	0.82	1.01
SAL	1.15	1.08
CE µs/cm	1880	1666
T c°	10.7	10.4

(ONA kenchela, 2016)

Tableau IV.2: caractéristiques physico-chimiques des eaux usées (Echantillon 2)

paramètres	Eau brute	Eau traitée
MES mg/l	325	36
DCO mg/l	610	158
DBO ₅ mg/l	410	38
P-PO ₄ ³⁻ mg/l	42.3	20.8
N-NO ₂ ⁻ mg/l	110	35.1
N-NO ₃ ⁻ mg/l	63.2	41.7
PH	8.08	8.02
O ₂	0.51	0.77
SAL	1.07	1.02
CE µs/cm	1862	1483
T c°	10.9	10.5

(ONA kenchela, 2016)

Tableau IV.3 : caractéristiques physico-chimiques des eaux usées (Echantillon 3)

paramètres	Eau brute	Eau traitée
MES mg/l	273	38
DCO mg/l	641	137
DBO ₅ mg/l	420	32
P-PO ₄ ³⁻ mg/l	38	19
N-NO ₂ ⁻ mg/l	106.2	41
N-NO ₃ ⁻ mg/l	52	34
PH	8.14	7.94
O ₂	0.23	0.57
SAL	1.02	0.99
CE µs/cm	1687	1524
T c°	11.8	11.5

(ONA kenchela, 2016)

IV.3. Variations des paramètres physico-chimiques :

IV.3.1. Le pH

Le pH moyen des trois échantillons mesurés à l'entrée des bassins est alcalin avec une valeur de 8.08, à la sortie des systèmes plantés nous avons enregistré une valeur moyenne de 7.99, ce qui indique que le traitement des eaux dans ces bassins à baisser légèrement le pH, mais l'eau reste toujours avec une tendance alcaline (figure IV.1).

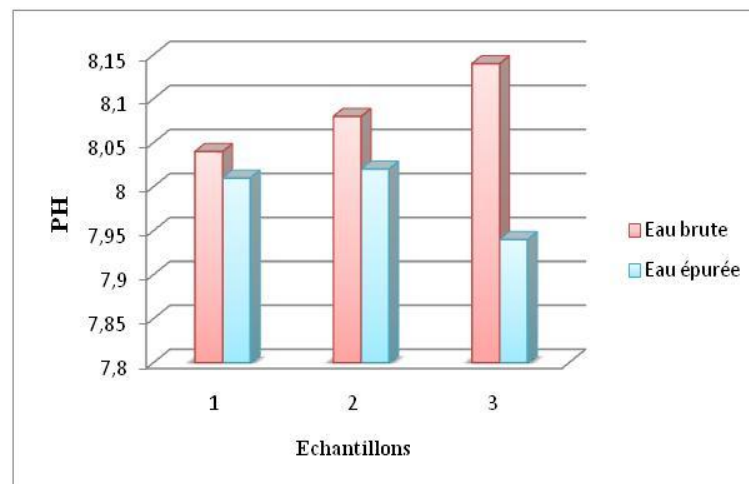


Figure IV.1 : Evolution du pH dans les eaux récupérées des bassins plantés par rapport aux eaux brutes

IV.3.2. Les MES

La valeur moyenne des MES enregistrée à l'entrée des bassins est de 311 mg/l, alors que nous avons enregistré après la fin du traitement à la sortie des systèmes plantés une valeur moyenne de 61 mg/l. Nous constatons d'après les résultats présentés sur la figure (IV.2), que les MES à la sortie des bassins plantés représentent une diminution par rapport à celui des eaux usées brutes, avec un taux d'abattement de 80.38%. Cette dernière montre que l'eau est devenue assez claire ce qui favorise la pénétration de la lumière cela indique que ce système de phyto-épuration présente un bon rendement épuratoire.

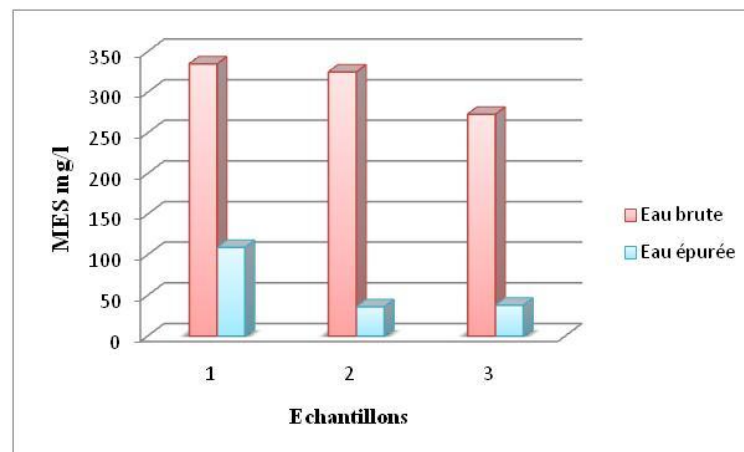


Figure IV.2 : Evolution du MES dans les eaux récupérées des bassins plantés par rapport aux eaux brutes

IV.3.3. La Salinité

La valeur moyenne de la salinité mesurée à l'entrée des bassins est de 1.08mg/l, alors qu'à la sortie des systèmes plantés est de 1.03mg/l. Nous constatons d'après les résultats présentés sur la figure (IV.3), que la salinité à la sortie des bassins plantés représente une baisse diminution par rapport à celui des eaux usées brutes, ce résultat expliqué par la diminution de la concentration des sels.

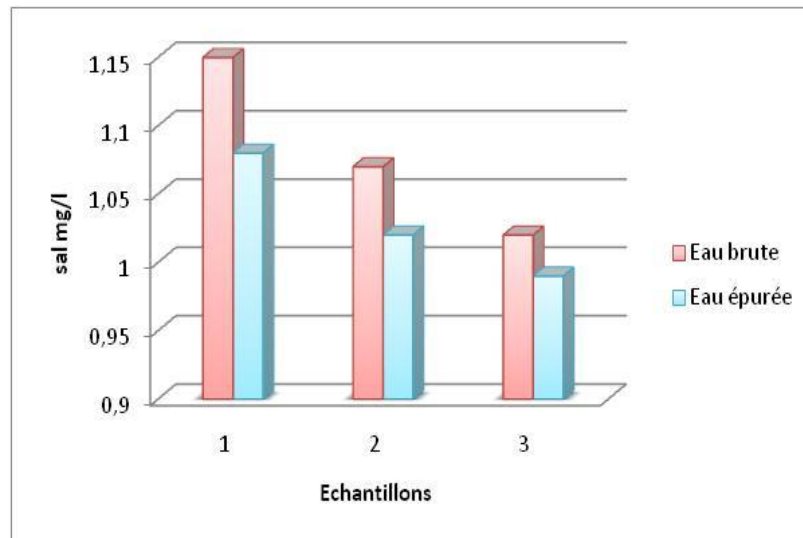


Figure IV.3 : Evolution de la salinité dans les eaux récupérées des bassins plantés par rapport aux eaux brutes

IV.3.4. La température

La valeur moyenne de la Température enregistrée à l'entrée des bassins est de 11.13°C , alors qu'à la sortie des systèmes plantés est de 10.8°C . Nous constatons d'après les résultats présentés sur la figure (IV.4), que la température à la sortie des bassins plantés représente une diminution par rapport à celui des eaux usées brutes, cette dernière est expliquée par l'influence de la température atmosphérique.

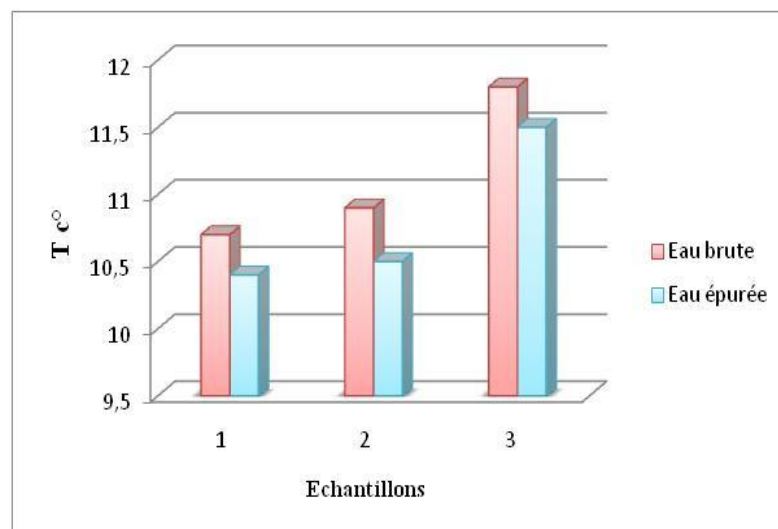


Figure IV.4 : Evolution de la température dans les eaux récupérées des bassins plantés par rapport aux eaux brutes

IV.3.5. La conductivité électrique

Dans la figure (IV.5), nous remarquons que la valeur moyenne de la conductivité enregistrée à la sortie des Bassins plantés, présente une grande variation par rapport aux eaux brutes, celle des eaux brute est de $1809\mu\text{s}/\text{cm}$ alors que celle des autres bassins plantés atteint une moyenne de $1557\mu\text{s}/\text{cm}$, avec un taux d'abattement de 13.93%. Cette diminution est liée à une diminution de la concentration des ions dans cette eau.

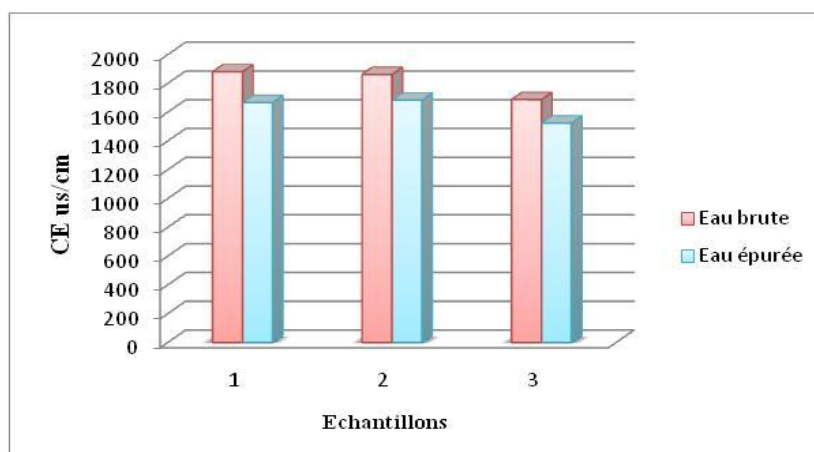


Figure IV.5 : Evolution de la conductivité électrique dans les eaux récupérées des bassins plantés par rapport aux eaux brutes

IV.3.6. L'oxygène dissous

La valeur moyenne d'oxygène dissous mesurée à l'entrée des bassins est de $0.53\text{mg}/\text{l}$, alors qu'à la sortie des systèmes plantés est de $0.78\text{mg}/\text{l}$. Nous constatons d'après les résultats présentés sur la figure (IV.6), que l'oxygène dissous à la sortie des bassins plantés représente une augmentation par rapport à celui des eaux usées brutes. Nous pouvons dire que cette augmentation est expliquée par l'activité photosynthétique qui est favorisée par la bonne pénétration de la lumière à cause de la diminution enregistrée de la MES.

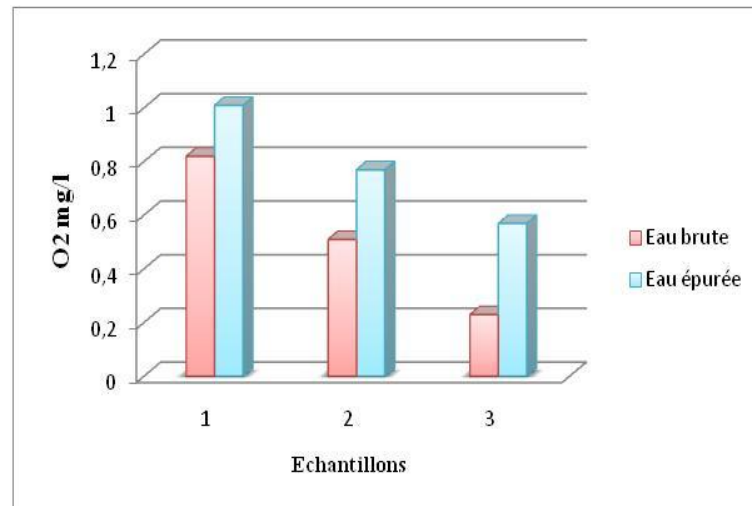


Figure IV.6 : Evolution d'oxygène dissous dans les eaux récupérées des bassins plantés par rapport aux eaux brutes

IV.3.7. La DBO₅

La valeur moyenne de la DBO₅ enregistrée à l'entrée des bassins est de 396mg/l, alors qu'à la sortie des systèmes plantés est de 36mg/l. on remarque d'après les résultats présentés sur la figure (IV.7), une diminution importante de la DBO₅ dans les eaux traitées, avec un taux d'abattement de 90.90%, donc on peut déduire que les eaux usées brutes sont riches en matière organique, qui sera par la suite dégradée par les bactéries pour fournir les besoins énergétique nécessaire à leur croissance.

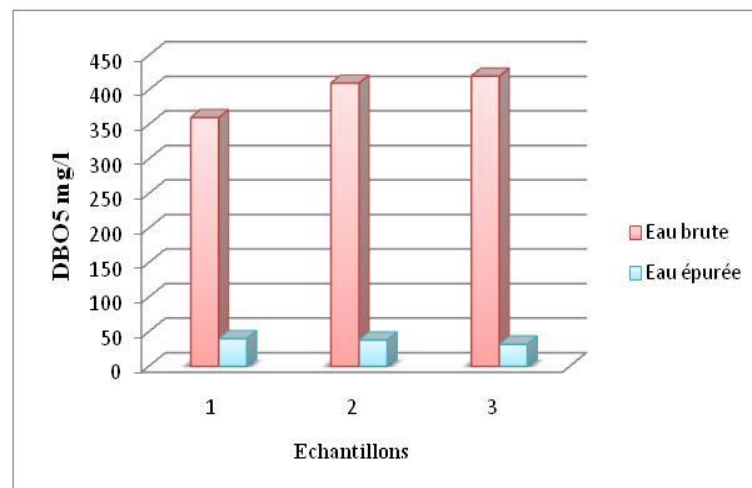


Figure IV.7 : Evolution de la DBO₅ dans les eaux récupérées des bassins plantés par rapport aux eaux brutes

IV.3.8. La DCO

La valeur moyenne de la DCO enregistrée à l'entrée des bassins est de 730mg/l, alors qu'on a enregistré la sortie des systèmes plantés une moyenne de 146mg/l. On remarque d'après les résultats présentés sur la figure (IV.8), que la DCO des eaux traitées a subi une diminution très importante avec un taux d'abattement de 80%. Ce dernier montre qu'il existe une dégradation très importante de la matière organique.

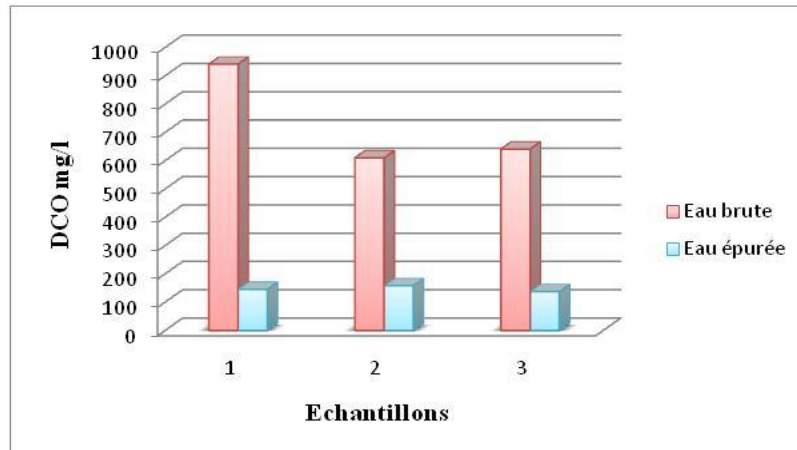


Figure IV.8 : Evolution de la DCO dans les eaux récupérées des bassins plantés par rapport aux eaux brutes

IV.3.9. Les nitrites

La concentration moyenne des nitrites enregistrée à l'entrée des bassins est de 76.84mg/l, alors qu'à la sortie des systèmes plantés on a enregistré une valeur de 29.20mg/l. On remarque d'après les résultats présentés sur la figure (IV.9), que la concentration des nitrites des eaux usées brutes est diminuée par rapport à celle des eaux épurées avec un taux d'abattement de 61.99%. Ce qui peut être expliqué par l'oxydation des nitrites par les bactéries nitrifiantes.

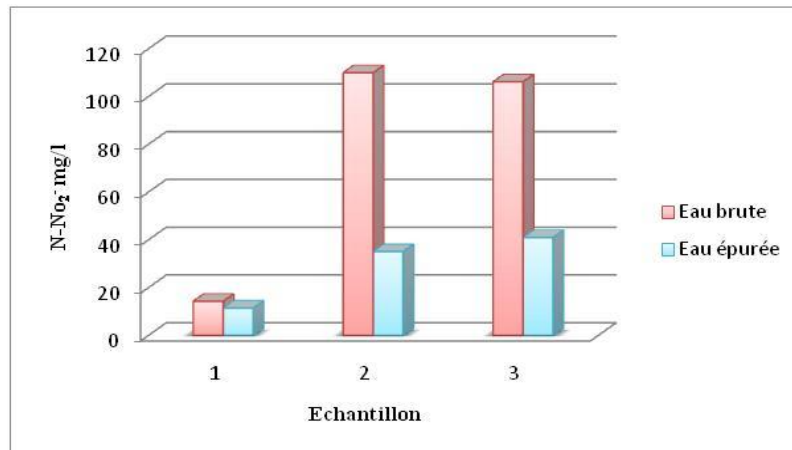


Figure IV.9 : Evolution de la concentration des nitrites dans les eaux récupérées des bassins plantés par rapport aux eaux brutes

IV.3.10. Les nitrates

La concentration moyenne des nitrates enregistrée à l'entrée des bassins est de 49.43mg/l, alors qu'à la sortie des systèmes plantés on a enregistré une moyenne de 32.5mg/l. On remarque d'après les résultats présentés sur la figure (IV.10), qu'il y a une diminution de la concentration des nitrates des eaux épurées par rapport aux eaux brutes, Ce qui peut être expliqué par la consommation de nitrate par la flore dénitrifiante, qui transforme les formes oxydés de l'azote (NO_3^-) en azote moléculaire N_2 .

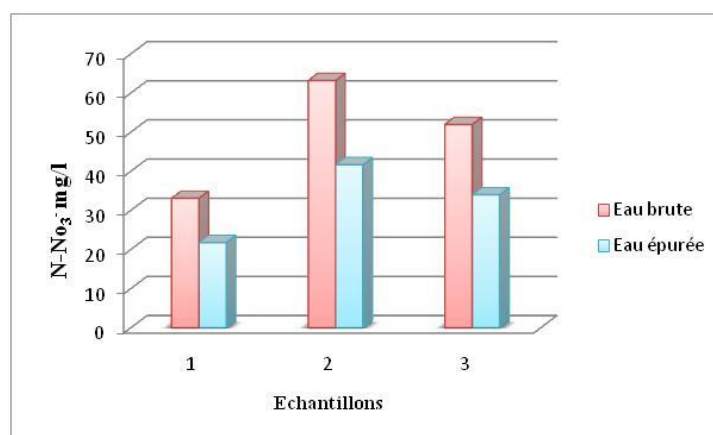


Figure IV.10 : Evolution de la concentration des nitrates dans les eaux récupérées des bassins plantés par rapport aux eaux brutes

IV.3.11. Les phosphates

La concentration moyenne des phosphates mesurée à l'entrée des bassins est de 30.90mg/l, alors qu'à la sortie des systèmes plantés on a enregistré une moyenne de 16.78mg/l. On remarque d'après les résultats présentés sur la figure(IV.11) une diminution importante de la concentration des phosphates des épurées par rapport a celle des eaux brutes,

avec un taux d'abattement de 45.69%. Nous pouvons dire que cette diminution est expliquée par la consommation des phosphates par la flore pour assurer leur développement et leur multiplication.

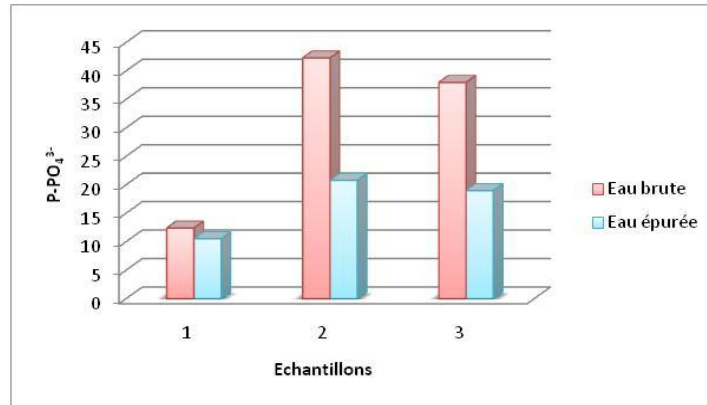


Figure IV.11 : Evolution de la concentration des phosphates dans les eaux récupérées des bassins plantés par rapport aux eaux brutes

IV.4. Conclusion

Dans ce chapitre, il a été question d'analyser le pouvoir épurateur de *Typha latifolia*. Les résultats obtenus montrent que Les bassins plantés de Typha, assure un bon abattement de tous les paramètres testés. On peut conclure que le traitement par filtres plantés à macrophytes semble être donc une alternative efficace et assez bien adapté aux eaux usées à charge polluante variable.

Conclusion générale

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. Le traitement de ces effluents est impératif. En effet il participe à la protection de l'environnement, la sauvegarde des composantes et richesses naturelles et surtout il offre la possibilité de réutiliser les eaux usées dans les domaines agricole et industriel.

Ce travail révèle la simplicité et l'efficacité des procédés naturels par filtres plantés par rapport à la complexité d'une station d'épuration classique. La conception de filtres plantés de macrophytes possède réellement de nombreux avantages ; c'est une technique simple, économique, efficace, fiable, adaptable au lieu, demandant peu d'entretien et qui s'insère bien de le paysage local.

Donc l'objectif de ce mémoire, a été d'analyser le pouvoir épurateur de plante aquatique à épurer les eaux usées provenant des rejets de la commune de Tamza situant dans la région de Khenchela. Le choix des plantes est un enjeu important dans les filtres plantés à macrophytes, car ils doivent survivre aux effets toxiques potentiels des eaux usées et de leur variabilité. Le matériel végétal (*Typha Latifolia*), utilisé dans les unités pilotes a été choisi sur la base des espèces végétales trouvées dans les alentours des rejets d'eaux usées.

Nous avons constaté d'après les résultats obtenus, que le pH à la sortie des bacs plantés représente une diminution par rapport à celui des eaux usées brutes. La conductivité des eaux récupérées par filtres plantés, atteint une moyenne inférieure à celle des eaux brutes. Cette diminution est liée à une diminution de la concentration des ions dans cette eau. Aussi on a remarqué une diminution de la DBO₅ et la DCO ainsi que la MES avec un taux d'abattement de 90.90%, 80%, 80.38% respectivement.

Pour l'oxygène dissous, nous avons constaté d'après les résultats obtenus que la valeur moyenne d'oxygène dissous enregistrée à la sortie des bassins plantés représente une augmentation par rapport à celui des eaux usées brutes. Nous pouvons dire que cette augmentation est expliquée par l'activité photosynthétique qui est favorisée par la bonne pénétration de la lumière à cause de la diminution observée de la MES.

Pour la réduction des nitrates et des nitrites, nous avons constaté d'après les résultats obtenus, une diminution remarquable des teneurs en nitrates et en nitrites à la sortie du filtre planté de *Typha* avec taux d'abattement de 34.25% et 61.99% respectivement.

Pour la réduction des phosphates, nous avons constaté d'après les résultats obtenus, une diminution remarquable des teneurs en phosphates à la sortie du filtre planté de *Typha* avec des un taux d'abattement de 45.69%

En fin, Le filtre planté de *Typha*, assure un bon abattement de tous les paramètres testés. On peut conclure que Le traitement par filtres plantés à macrophytes semble être donc une alternative efficace et assez bien adapté aux eaux usées à charge polluante variable.

Références bibliographiques

Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse (1999), Epuration des eaux usées domestiques par des filtres plantes de macrophyte, étude bibliographique, 78p

Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), 1999. Toxicological profile for chlorophenols. Department of health and human services, public health service. Atlanta, GA (USA).

Alain Vavasseur & all ; 2008 Des plantes pour dépolluer ou stabiliser des éléments toxiques dans les sols et les eaux

ANONYME I, 1999. CHAPITRE II, généralités sur la pollution atmosphérique et ses effets, Projet du plan régional pour la qualité de l'air en Bourgogne Juillet 1999

ANONYME II, 1999/2000 . Plan Régional Pour La Qualité De L'air – Provence Alpes Côte-D'azu

ANONYME III, 2002 : Les Connaissances Générales., Plan Régional pour la Qualité de l'Air en région Centre).

Armstrong J. Armstrong W. (1988). Phragmites australis – a preliminary of study of soil oxidising sites and internal gas transport pathways. Newphytol, 108, pp 373-382

Asano . T, (1998). Wastewater reclamation and reuse. Water quality management library, wat. St. Tech. 1998, 1475

Atuanya E. I. & Chkrabarti T., 2003. Kinetics of biotransformation of 2,4-dichlorophenol using UASB-reactor. *Environmental Monitoring and Assessment*, **96**: 129–141.

Bare, Janet E. 1979 :Canadian Journal of Plant Science.

Barriuso E., Calvet R., Schiavon M & Soulas G., 1996. Les pesticides et les polluants organiques des sols. Transformation et dissipation. Forum le sol, un patrimoine menacé? Paris (France), 279-292.

BLANCHOT, 2002 . BLANCHOT L., Doctissimo : Ma santé en un mot, pollution atmosphérique : Quels effets sur la santé ? Septembre 2002.

Bontoux.J, (1993).Introduction a l'étude des eaux douce, eaux naturelle, eaux usees, eaux de boisson : qualité et sante. 2eme Edition : Lavoisier Technique et documentation. Paris. 163p

Boucheseiche C., Cremille E., Pelte T.&Pojer K., 2002. Pollution toxique et écotoxicologique : notions de base. Guide technique N°7. Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse, Montpellier (France).

Brix., (1993); Macrophyte mediated oxygen transfer in constructed wetlands: transport mechanisms and rates wetlands laboratory and the University of West. Florida institute for coastal and estuarine research, Constructed wetlands for. Water quality improvement, Backhuys publisher. P 391-398. Campagnes 1997 et 1998. Dans rapports sur les études et recherches entreprises dans le bassin lémanique. Programme quinquennal 1996-2000. Campagne 1998 . CIPEL lausanne pp.129-217.

BUCHDAHL, 2000 . BUCHDAHL J., Encyclopedia of the Atmospheric Environment, 2000

Chassin P., Baize D., Cambier Ph. & Sterckeman T., 1996. Les éléments traces métalliques et laqualité des sols : impact à moyen et à long terme. Forum « le sol un patrimoine menacé ?». Paris(France), 297-303.

Cherak.L, (1999). Étude expérimentale de l'influence des eaux résiduaires (Batna, fèsdis, El-madher) sur certaines activités microbiennes (minéralisation du carbone et de l'azote) dans un sol calcaire de la région d'El-Madher (W.de Batna). Incidence sur les microflores telluriques et le comportement d'une graminée fougère (*Avena abla* "WL"-88).Thèse magister- institue d'agronomie. Université Batna. 108p

Chu W., Kwan C. Y., Chan K. H. & Kam S. R., 2005. Kinetics modeling and reaction pathway of 2, 4-dichlorophenol transformation by photo-fenton-like oxydation. Journal of Hazardous Materials, **121**: 119-126.

CITEPA,2002 . Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique

Claude Augé 2010, le petit larousse,dictionnaire de la langue française

Crosinier J., 1999. Devenir de la pollution métallique drainée par les eaux pluviales, influence du compartiment microbien et des alternances de dessiccation/réhumectation sur le transfert du zinc dans la zone non saturée du sol. Thèse de Doctorat. Université de Claude Bernard – Lyon I (France).

DAY, 1999 DAY R., Enquête préliminaire sur l'impact de la décharge publique de BOULIMAT (BEJAIA) sur la santé humaine. PFE écologie, Univ Abderrahmane Mira Béjaia. 1999.

De S., Pramanik S. K., Williams A. L. & Dutta S. K., 2004. Toxicity of polychlorobiphenyls and its Bioremediation. *International Journal of Human Genetics*, **4 (4)**: 281-290

Dittmer, U. (2006). Constructed wetlands for CSO treatment: an overview of practice and research in Germany. *Water Sci. Technol.*, 51(9), 23-30

Dobbins, D.C., Thornton-Manning J., Jones D.D. & Federle T.W., 1987. Mineralization potential for phenol in subsurface soils. *Journal of Environmental Quality*, **16**: 54-58.

EPA, (1993). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment and Wildlife Habitat EPA832-R-93-005 September 1993

Eshighi Malayri B., 1995. Décontamination des sols contenant des métaux lourds à l'aide de plantes et de microorganismes. Thèse de Doctorat. Université de Nancy1 (France)

Fava L., Orrù M. A., Crobe A., Barra Caracciolo A., Bottoni P. & Funari E., 2005. Pesticides metabolites as contaminants of ground water resources: assessment of the leaching potential treatment of endosulfan sulphate, 2,6-dichlorobenzoic acid, 3,4-dichloroaniline, 2,4 dichlorophenol and 4-chloro-2-methyl phenol. *Microchemical journal*, **79**: 207-211.

Fdil F. 2004. Etude de la biodégradation des herbicides chlorophenoxy alcanoïques par des procédés photochimiques et électrochimiques, applications environnementales. Thèse de Doctorat. Université de Marne-La-Vallée (France).

Franck .Rejets, (2002) Analyse des eaux ,aspects réglementaires et techniques Edition :Scérène. P. 166-198

Goel, P.K. (2006). Water Pollution - Causes, Effects and Control. New Delhi: New Age International. ISBN 978-81-224-1839-2.)

Heinrich H, Gevensleben H, Strehl U. Annotation: neurofeedback - train your brain to train behaviour. *J Child Psychol Psychiatry.* **2007**;48:3-16.

James D. Sartor, Gail B. Boyd and Franklin J. Agardy,Journal (Water Pollution Control Federation)Vol. 46, No. 3, Part I (Mar., 1974), pp. 458-467)

Jeannot, R., Lemièrre B., Chiron S. Augustin F. & Darmendrail D., 2000. Guide méthodologique pour l'analyse des sols pollués. Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement. France.

Journal officiel, 1983 . Journal officiel de la République Algérienne du 08/02/1983. Loi n°83-03 du 5 février 1983, relative à la protection de l'environnement.

Julie Misson-Pons & all , 2008 , Des plantes pour dépolluer ou stabiliser des éléments toxiques dans les sols et les eaux

Kankou Mohamed Ould Sid Ahmed., 2004. Vulnérabilité des eaux et des sols de la rive droite du fleuve Sénégal en Mautitanie- Etude en laboratoire du comportement de deux pesticides. Thèse Doctorat. Université de Limoges (France).

Lalanne F. 2006. Etude des potentialités du lavage biologique pour le traitement d'un mélange complexe de composés volatils. Thèse de Doctorat. L'université de Pau et des Pays de l'Adour (France).

Malick Gaye, ed :Guide pratique pour la mise en place de systèmes sociaux alternatifs d'assainissement condominium en milieu urbain et périurbain

Mason, Herbert L. 1957 : A flora of the marshes of California

Matafonova G., Shirapova G., Zimmer C., Giffhorn F., Batoev V. & Kohring G. W., 2006.Degradation of 2,4-dichlorophenol by *Bacillus* sp. isolated from an aeration pond in the Baikalsk pulp and paper mill (Russia). *International Biodeterioration and Biodegradation*, **58**: 209-212.

Mérian E., 1991. Metals and their compounds in the environment: occurrence, analysis and biological relevance. Wiley-VCH, Weinheim (Allemagne).

Meseck, S.L., J.H. Alix, and G.H. Wikfors. 2005. Photoperiod and light intensity effects on growth and utilization of nutrients by the aquaculture feed microalga, *Tetraselmis chui* (PLY429). *Aquaculture* 246: 393-404.

Olivier, T. (1995).Métriologie des eaux résiduaire. TEC et DOC, paris : 7-57

ONA khenchela, 2016.

Ouali, 2001 M ,S (2001). Cours de procédé unitaires biologique et traitement des eaux. Edition ; OPU, Ben aknon, Alger p ;17

Pierre Richaud & all ;2008 : Des plantes pour dépolluer ou stabiliser des éléments toxiques dans les sols et les eaux

Poulet, et al, (2003). Urban wastewater treatment in stabilization ponds: occurrence and removal of pathogens. *Urban water* 2002 ; 4:255-262.

Poulet. J.B, & al, 2004)..Stations depurations à lits filtrants plantés de macrophytes. *Courier du s'avoir*, N°5, pp.103-106.

Puhatika J. A. & Jarvinen K., 1992. Aerobic fluidized-bed treatment of polychlorinated phenolic wood preservative constituents. *Water Resources*, **26**: 765-770.

Radoux et Kemp, 1992. Rôle de la fréquence des prélèvements de la biomasse produite sur les capacités épuratrices de *Lemna minor*. *Revue des Sciences de l'Eau*, 5, 55-68.

Ramade R., 2000. Dictionnaire encyclopédique des pollutions. Ediscience international. Paris (France), 58-365

René Moletta 2010 :Moletta Méthanisation ;La pollution de l'eau

Rodier. J, (1984).L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer. Edition : bordas, paris P 1365

Smith, V. H., Tilman, G. D., & Nekola, J. C. (1999). Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems ,*Environmental pollution*, 100(1), 179-196)

T. M. Barkley & all 1986 : Flora of the Great Plains

Urios.L, (2005). Technique D'épuration des eaux usées. Technique et documentation.Paris P : 11.

WOZNIAK R. (2008). Ermittlung von Belastungsgrenzen an Bodensubstraten zur weitergehenden Mischwasserbehandlung in Retentionsbodenfiltern. Thèse d'exercice de Génie Civil. Lieu de soutenance: Kaiserslautern, 2008, 202p

Zhao G, et al. (2009) Structural and mutational studies on the importance of oligosaccharide binding for the activity of yeast PNGase. *Glycobiology* 19(2):118-125

Résumé

Nous avons traité dans notre mémoire une analyse expérimentale du pouvoir épurateur d'une plante aquatique à épurer les eaux usées provenant des rejets de la commune de Tamza situant dans la région de Khenchela. Nous avons réalisé cette étude au niveau de l'office national d'assainissement de la wilaya de Khenchela, Le matériel végétal (*Typha Latifolia*), utilisé dans les unités pilotes a été choisi sur la base des espèces végétales trouvées dans les alentours des rejets d'eaux usées.

Les résultats obtenus montrent que Le filtre planté de *Typha*, assure un bon abattement de tous les paramètres testés. On peut conclure que Le traitement par filtres plantés à macrophytes semble être donc une alternative efficace et assez bien adapté aux eaux usées à charge polluante variable.

Mots-clés : La pollution, eaux usées, phytoépuration, macrophytes, phytoremédiation.

abstract

We treated our memory an experimental analysis of the purifying capacity of an aquatic plant to treat the wastewater resulting from releases of the common of Tamza located in Khenchela region. We conducted this study at the national sanitation office of the wilaya of Khenchela, Plant material (*Typha latifolia*), used in the pilot plant was selected on the basis of plants species found around the releases of wastewater.

The results show that the filters planted of *Typha*, ensures a good abattement of all tested parameters. We can conclude that the Treatment with filters planted at macrophytes seems to be an effective alternative and quite well suited to wastewater at pollution load variable.

Keywords : pollution, wastewater, phyto purification, macrophyte, phytoremediation

ملخص

قمنا في هذه المذكرة بمعالجة التحاليل التجريبية لقدرة التصفية النباتية المائية على معالجة المياه المستعملة الواردة من نفايات بلدية طامزة الواقعة ببلدية خنشلة، تمت هذه الدراسة على مستوى الديوان الوطني للتطهير لمدينة خنشلة. اخترنا النبتة *Typha Latifolia* في الوحدات النموذجية و ذلك لتواجدها على ضفاف مجاري المياه المستعملة.

النتائج المتحصل عليها تبين أن الأحواض المزروعة بهذه النبتة (*Typha Latifolia*) تضمن نتائج جيدة لجميع العناصر المجرية.

نستنتج أن المعالجة بالأحواض النباتية، يمكن استعمالها كبديل فعال، ومتأقلم جيد لمعالجة المياه المستعملة على تنوع المادة الملوثة لها.

الكلمات المفتاحية: التلوث، المياه المستعملة، المعالجة النباتية للمياه المستعملة