

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche
scientifique



Université 8 Mai 1945 Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie des Procédés

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de
MAGISTER

=====

*Etude d'un mécanisme de traitement des
eaux superficielles à base des plantes
végétales*

=====

Filière : Génie des Procédés
Option : Génie des Matériaux

Présenté par : Fatima Zohra BOUZIT

Devant le jury:

Abed Mohamed AFFOUNE	Pr.	Université de Guelma	Président
Abderrafik NEMAMCHA	M.C. A	Université de Guelma	Rapporteur
Mohamed El Hocine BENHAMZA	Pr.	Université de Guelma	Examineur
Noureddine MAZA	M.C. A	Université d'O. El Bouaghi	Examineur
Hayet MOUMENI	M.C. A	Université de Guelma	Examineur

Année 2012

DÉDICACE

Ce mémoire est dédié à ma très chère mère et à mon très cher père pour leur amour, leur soutien et leur présence à mes côtés durant tout le parcours de ma vie.

Il est aussi dédié à mes très chers frères, à ma très chère sœur Hiba et son mari et à Mouna et Leila.

A mes très chers neveux

A mes chères amies Amira, Nadjet et Sara

J'exprime ici ma profonde gratitude et ma reconnaissance à toutes mes enseignantes et tous mes enseignants du primaire, secondaire et universitaire pour le savoir qu'ils m'ont inculqué. Je le dédie aussi à toute ma famille, à toutes mes amies et tous les étudiants de ma promotion.

Fatima Zohra

REMERCIEMENTS

Louange à Allah qui m'a fait le bonheur d'achever ce travail.

Que Monsieur A. NEMAMCHA, Maître de conférence (A) à l'Université de Guelma et directeur de mon mémoire accepte l'expression de ma respectueuse reconnaissance d'avoir accepté de diriger ce travail, qu'il soit assuré de mon entière gratitude, pour son aide précieuse, sa disponibilité et qu'il trouve ici mon estime pour sa grande personne ainsi que mon profond respect.

Je tiens à exprimer aussi ma gratitude à Monsieur A. M. AFFOUNE, Professeur à l'Université de Guelma pour l'honneur qu'il me fait d'avoir accepté de présider le jury de soutenance de ce mémoire.

Je remercie également Monsieur M. H. BENHAMZA, Professeur à l'Université de Guelma pour l'intérêt qu'il a porté à mon travail et pour sa bonté d'avoir accepté de juger ce travail.

Je tiens à exprimer ici ma reconnaissance et mon profond respect à Monsieur N. MAZA, Maître de Conférences (A) à l'Université de O. EL Bouaghi, pour ses précieux conseils, sa gentillesse et sa bonté en exceptant d'examiner ce travail.

Madame H. MOUMENI Maître de conférences (A) à l'Université de Guelma a montré beaucoup d'intérêt à mon travail et elle a eu la gentillesse d'accepter de faire partie du jury qu'elle trouve ici tous ma profonde gratitude.

J'adresse également mes remerciements à Monsieur N. BOUHADAD pour son accueil dans son service au sein d'ANRH et son aide précieuse.

Mes profonds remerciements à Djawhara.

Résumé

Le traitement des eaux par les plantes macrophytes est une technique d'épuration qui prend de l'ampleur de jour en jour du fait qu'elle possède l'avantage d'être économique, propre et non polluante.

L'objectif de la présente étude est de tester la capacité épuratoire du *Phragmites australis* (roseau), qui est une plante macrophyte jouissant de potentialités épuratoires et d'un pouvoir d'absorption des contaminants, et de mettre en évidence ses potentialités à épurer une eau usée prise dans un oued proche d'une zone industrielle où les rejets risquent de contenir des substances nuisibles à l'environnement tel que les métaux lourds.

Le dispositif expérimental utilisé est constitué de 3 bacs de 100 litres chacun, remplis sur une épaisseur de 10 cm de gravier surmontée par une couche de sol (limono-argilo-sableuse) de 40 cm d'épaisseur. Dans ces bacs sont plantés de jeunes tiges de roseaux avec une densité maximale.

Le suivi des performances épuratoires du système à roseau montre que ce dernier assure une élimination de la charge organique (MES : 95,45 %, DCO : 90,90 %) et fournit des eaux épurées claires et limpides.

Le fer (Fe) subit également un abattement dans sa concentration à la sortie du système pour un temps de séjour très court (Fe : 91,22 %).

Les résultats obtenus confirment la capacité globale du dispositif conçu à traiter des rejets industriels (eaux usées) afin de minimiser la pollution et les risques sanitaires.

Mots-clés : *Traitement des eaux, filtres à macrophytes, analyses physico-chimiques, fer (Fe).*

Abstract

The wastewater treatment by macrophytes plants is a purification technique, which is growing day by day because it has the advantage of being economical, clean and nonpolluting. This technique is essentially based on a principle of biological treatment.

The aim of this study was to test the treatment capacity of *Phragmites australis* (reed) and highlight its potential to purify wastewater outlet in a wadi near of an industrial park where releases may contain a noxious substances such as the heavy metals which are harmful to the environment.

The experimental pilot is constituted of 3 tanks of 100 liters each one, were filled to depths of 10 cm and 40cm with gravel and soil respectively (sandy-clay-loam); planted with young reed stems with a maximal density.

The test of purification performance of reeds systems show that it ensures the removal of organic load (TSS: 95,45 %, COD: 90,90 %) and provides purified water clear and limpid.

Iron (Fe) also undergoes a reduction in its concentration in the system output for a very short residence time (Fe: 91,22 %).

The results confirm the overall capacity of The experimental pilot to treat industrial discharges (wastewater) to minimize pollution and health risks.

Key-words: *Water treatment, macrophytes filters, physicochemical analyzes, iron (Fe).*

ملخص

معالجة المياه بواسطة النباتات المائية المرئية ذات الأوراق الكبيرة هي تقنية لتصفية المياه الملوثة اعتمادا على مبدأ بيولوجي. حظيت هذه التقنية في أيامنا هذه باهتمام العديد من الباحثين لكونها توفر الكثير من المزايا مثل كونها اقتصادية، نظيفة، غير ملوثة.

تهدف دراستنا هذه إلى التعرف على قدرة القصب على تصفية مياه ملوثة مأخوذة من وادي قريب من منطقة صناعية حيث أنه من الممكن تواجد مواد مضره بالمحيط كالمعادن الثقيلة.

الجهاز التجريبي المستعمل مكون من 3 أحواض، سعة كل واحد منها 100 لتر، مملوءة بطبقة من الحصى الصغيرة بسمك 10 سم، فوقها طبقة من الرمل بسمك 40 سم، أين تم غرس داخل هذه الأحواض شتلات صغيرة من القصب بكثافة قصوى.

بينت دراستنا من خلال التجارب المجراة أن هذه المعالجة أنقصت التركيز العضوي في مدة زمنية معقولة (المواد العالقة (45، 95%)، الطلب الكيميائي للأكسجين (90، 90%)، أما الحديد فقد نقص تركيزه هو الآخر (91، 22%) ونتاجت عن هذه التجارب مياه صافية وشفافة.

أكدت النتائج المحل عليها على القدرة الفعالة للطريقة المتبعة على معالجة المياه الملوثة قصد الإنقااص من التلوث و المخاطر الصحية.

الكلمات المفتاحية: معالجة المياه، المرشحات بواسطة النباتات ذات الأوراق الكبيرة ، تحاليل فزيوكيميائية، الحديد (Fe).

LISTE DES ABREVEATIONS

ERU	Eaux résiduaires urbaines
ERI	Eaux résiduaires industrielles
MES	Matières en suspension
O.M.S	Organisation Mondiale de la Santé
NTU	Unité néphélométrique de turbidité
TH	Degré hydrotimétrique
TCa	Dureté calcique
TM	Dureté magnésienne
P	Dureté permanente
TA	Titre alcalimétrique
TAC	Titre alcalimétrique complet ou
DBO	Demande Biologique en Oxygène
DCO	Demande Chimique en Oxygène
COT	Carbone Organique Total
<i>H</i>	Hauteur
<i>D</i>	Diamètre
I.C.P	Inductively Coupled Plasma

TABLE DES MATIERES

Liste des abréviations.....	i
Liste des figures	vi
Liste des tableaux	vii

INTRODCUTION GENERALE	1
------------------------------------	----------

CHAPITRE I: GENERALTES SUR LES EAUX

Introduction.....	3
I – 1 – Cycle de l’eau	3
I – 2 – Composition et structure d’une molécule d’eau	4
I – 3 – Différents états de l’eau.....	5
I – 4 – Classification des eaux.....	5
I – 4 – 1 – Eaux naturelles.....	5
<i>I – 4 – 1 – 1 – Eaux de pluie</i>	<i>5</i>
<i>I – 4 – 1 – 2 – Eaux souterraines</i>	<i>6</i>
<i>I – 4 – 1 – 3 – Eaux de surface.....</i>	<i>6</i>
<i>I – 4 – 1 – 4 – Eaux des mers et océans</i>	<i>7</i>
I – 4 – 2 – Eaux de consommation.....	7
I – 4 – 3 – Eaux industrielles.....	8
I – 4 – 4 – Eaux usées.....	9
<i>I – 4 – 4 – 1 – Eaux résiduaires urbaines</i>	<i>9</i>
<i>I – 4 – 4 – 2 – Eaux résiduaires industrielles</i>	<i>9</i>
I – 5 – Les principaux constituants des eaux naturelles	10
I – 5 – 1 – Les composés minéraux.....	10
<i>I – 5 – 1 – 1 – Les gaz dissous.....</i>	<i>10</i>
<i>I – 5 – 1 – 2 – Les électrolytes minéraux</i>	<i>10</i>
I – 5 – 2 – Les composés organiques	11
I – 6 – Caractéristiques des eaux	11
I – 6 – 1 – Propriétés physiques de l’eau	11
I – 6 – 2 – Propriétés chimiques de l’eau	13
I – 6 – 3 – Propriétés biologiques de l’eau.....	14
I – 7 – La pollution des eaux.....	14
I – 7 – 1 – Définition de la pollution des eaux	14

I – 7 – 2 – Les différentes origines de la pollution des eaux.....	15
I – 7 – 2 – 1 – Pollution d’origine domestique	15
I – 7 – 2 – 2 – Pollution d’origine industrielle	16
I – 7 – 2 – 3 – Pollution d’origine agricole	16
I – 7 – 2 – 4 – Pollution d’origine naturelle	18
I – 7 – 2 – 5 – Pollution par les eaux pluviales.....	18
I – 8 – Les principaux polluants des eaux naturelles	18
I – 8 – 1 – Polluants physiques.....	18
I – 8 – 2 – Polluants chimiques	19
I – 8 – 2 – 1 – Polluants chimiques organiques	20
I – 8 – 2 – 2 – Polluants chimiques inorganiques.....	20
I – 8 – 3 – Polluants biologiques	21
Conclusion.....	22

CHAPITRE II: PARAMETRES DE QUALITES DE L'EAU

Introduction	23
II – 1 – Paramètres organoleptiques	23
II – 1 – 1 – Odeur	23
II – 1 – 2 – Couleur	24
II – 1 – 3 – Goût	24
II – 1 – 4 – Turbidité	25
II – 2 – Paramètres physicochimiques	25
II – 2 – 1 – Température.....	25
II – 2 – 2 – Le pH	26
II – 2 – 3 – Conductivité	26
II – 2 – 4 – Dureté	27
II – 2 – 5 – L’alcalinité.....	28
II – 2 – 6 – Matières en suspension (MES)	29
II – 2 – 7 – Les matières minérales	29
II – 2 – 7 – 1 – Cations.....	29
II – 2 – 7 – 2 – Anions	30
II – 3 – Paramètres organiques	32
II – 3 – 1 – La demande biologique en oxygène (DBO).....	32
II – 3 – 2 – La demande chimique en oxygène (DCO)	33

II – 3 – 3 – Carbone organique total (COT).....	33
II – 4 – Paramètres biologiques.....	33
Conclusion.....	35

CHAPITRE III: TRAITEMENT DES EAUX PAR PLANTES MACROPHYTES

Introduction.....	36
III – 1 – Types de plantes utilisées.....	37
III – 2 – Le <i>Phragmites australis</i> (roseau).....	39
III – 2 – 1 – Définition.....	39
III – 2 – 2 – Avantages.....	39
III – 3 – Principe de l'épuration par macrophyte.....	40
III – 3 – 1 – Les filtres plantés à écoulement vertical.....	42
III – 3 – 2 – Les filtres plantés à écoulement horizontal.....	44
III – 4 – Les systèmes hybrides.....	45
III – 5 – Principales caractéristiques de l'épuration par lits plantés.....	45
III – 6 – La plantation des macrophytes.....	46
III – 7 – L'évacuation des boues.....	47
Conclusion.....	48

CHAPITRE IV: CONCEPTION DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Introduction.....	49
IV – 1 – Présentation générale filtres plantés de <i>Phragmites australis</i> (roseau).....	49
IV – 1 – 1 – Principe de la technique.....	49
IV – 1 – 2 – Caractéristiques générales.....	50
IV – 2 – Critères de choix du <i>phragmites australis</i> (roseau).....	50
IV – 3 – Technique de l'épuration.....	51
IV – 3 – 1 – Description du dispositif expérimental.....	51
IV – 3 – 2 – Rôles des différentes composantes du dispositif.....	52
IV – 3 – 2 – 1 – <i>Le gravier</i>	52
IV – 3 – 2 – 2 – <i>Le sol</i>	53
IV – 3 – 2 – 3 – <i>Les macrophytes</i>	54
IV – 3 – 2 – 4 – <i>Les micro-organismes</i>	57
IV – 4 – Etapes de réalisation de l'expérience.....	57
Conclusion.....	59

CHAPITRE V: RESULTATS ET DISCUSSIONS

Introduction	60
V – 1 – Réalisation de l’expérience	60
V – 1 – 1 – Analyse du sol	60
V – 1 – 1 – 1 – Détermination du volume des pores de sol.....	60
V – 1 – 1 – 2 – Détermination du volume de saturation du sol	66
V – 1 – 2 – Analyses de l’eau avant et après traitement	67
V – 1 – 2 – 1 – Analyse des matière esn suspension (MES).....	67
V – 1 – 2 – 2 – Analyse de la demande chimique en oxygène (DCO).....	69
V – 1 – 2 – 3 – Analyse du fer (Fe)	73
V – 2 – Interprétation des résultats	74
V – 2 – 1 – Matière esn suspension (MES).....	74
V – 2 – 2 – Demande chimique en oxygène (DCO)	76
V – 2 – 3 – Le fer (Fe).....	78
CONCLUSION GENERALE	80
Références bibliographiques	82
Annexes	

LISTE DES FIGURES

Figure I – 1 : Géométrie de la molécule H ₂ O.....	4
Figure I – 2 : Diagramme des phases de l'eau.	5
Figure I – 3 : Composition d'une eau usée domestique.....	9
Figure I – 4 : Pollution domestique de l'eau	15
Figure I – 5 : Pollution industrielle de l'eau	16
Figure I – 6 : Pollution agricole	17
Figure I – 7 : Les polluants physiques, échelle de dimensions et états correspondants	18
Figure III – 1 : Photos de quelques plantes macrophytes.	37
Figure III – 2 : <i>Phragmite australis</i> (roseau).....	39
Figure III – 3 : Filtre à écoulement verticale avant et après plantation de roseaux.....	41
Figure III – 4 : Schéma du Pragmifiltre.....	41
Figure III – 5 : Coupe transversale schématique d'un filtre à écoulement vertical.....	43
Figure III – 6 : Coupe transversale schématique d'un filtre à écoulement horizontal.....	44
Figure IV – 1 : Filtration par les <i>Phragmites australis</i> (roseaux).....	49
Figure IV – 2 : Schéma du dispositif expérimental.....	52
Figure IV – 3 : Couche de gravier.....	53
Figure IV – 4 : Couche de sol	54
Figure IV – 5 : <i>Phragmites australis</i> (roseau) utilisé.....	54
Figure IV – 6 : Photographie d'une tige de <i>Phragmites australis</i> (roseau) implanté	55
Figure IV – 7 : Racines et rhizomes du <i>Phragmite australis</i> (roseau).....	56
Figure V – 1 : Schéma de détermination de la densité apparente (ρ_{app})	61
Figure V - 2 : Expérience de la détermination de la demande chimique en oxygène (DCO)..	71
Figure V – 3 : Spectrométrie d'émission avec plasma à couplage inductif (ICP).	73
Figure V – 4 : Evolution temporelle des MES	75
Figure V – 5 : Pourcentage d'abattement en MES.....	76
Figure V – 6 : Evolution temporelle de la DCO.....	77
Figure V – 7 : Pourcentage d'abattement en DCO.....	78
Figure V – 8 : Evolution temporelle du Fe.....	79

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I – 1 : Principales différences entre eaux de surface et eaux souterraines	7
Tableau I – 2 : Principales utilisation industrielles de l'eau et sources d'eau possibles.....	8
Tableau I – 3 : Principales constantes physiques de l'eau pure	12
Tableau II – 1 : Relation entre minéralisation et conductivité.....	27
Tableau II – 2 : Les principales infections humaines transmissibles par l'eau	34
Tableau III – 1 : Principales espèces des plantes utilisées.	38
Tableau V – 1 : Caractéristiques physico-chimiques du sol utilisé.	66
Tableau V – 2 : Analyse des matières en suspension (MES).....	69
Tableau V – 3 : Analyse de la demande chimique en oxygène (DCO)	73
Tableau V – 4 : Analyse du fer (Fe).....	74

Introduction Générale

INTRODCUTION GENERALE

L'eau, élément à la source de la vie, est depuis toujours une richesse inestimable [1], elle est importante aussi bien que dans la vie et dans l'économie humaine [2]. Elle constitue, à l'heure actuelle, la source naturelle la plus indispensable mais aussi la plus menacée par les activités humaines [3].

Sous la pression des besoins considérables et en raison de l'accroissement de la population, on est passé de l'emploi des eaux de sources et de nappes, à une utilisation de plus en plus poussée des eaux de surface [2].

La qualité des eaux de surface a été altérée par des pratiques agricoles, industrielles et domestiques [1] d'où l'apparition de difficultés de plus en plus ardues. A titre d'exemple, la présence des métaux lourds dans l'environnement, provenant des rejets industriels métallurgiques, peuvent se déposer dans les cours d'eaux et par conséquent les contaminer.

Suivant les concentrations rencontrées, le plomb, le mercure, le cadmium, l'arsenic, le cuivre, le zinc et le chrome peuvent avoir des conséquences périlleuses pour la santé. Leur présence, même à faible concentration, peut entraîner une accumulation dans l'organisme provoquant ainsi des effets toxiques aigus et chroniques [4].

Face aux difficultés occasionnées, de différentes technologies ont été développées afin de procéder au traitement des eaux contaminées en vue de leur épuration et l'obtention d'une eau moins polluée éliminant ou diminuant ainsi les risques nuisibles à l'environnement.

De nos jours, la croissance continue des couts d'investissement et d'exploitation des techniques traditionnelles ainsi que les difficultés qui les accompagnent [5], ont montré que ces derniers ont atteint leurs limites [6] et elles deviennent de plus en plus controversées [7].

Pour ces raisons, l'humanité a développé d'autres approches diverses à travers des procédés admissibles techniquement et économiquement [5]. Parmi ces approches nous citons les techniques d'épuration se basant sur les végétaux aquatiques (macrophytes), d'où l'intérêt grandissant [8] réservé à ces derniers à cause de leur utilisation dans l'épuration des eaux usées [9].

Les systèmes de traitement des eaux usées utilisant des plantes ont apparu depuis plus d'un siècle. Les premières expériences ont vu le jour en Allemagne à travers les travaux du Professeur biologiste Käte SEIDEL [10].

Ce type de procédé est devenu plus populaire au début des années 1980 alors que les spécialistes de différents pays essayaient de développer d'autres procédés mieux adaptés aux petites municipalités et aux industries isolées [9] en utilisant généralement l'écoulement gravitaire des eaux qui ne nécessite pas un apport supplémentaire en énergie.

Sur l'aspect financier, cette technologie, relativement peu onéreuse, se positionne parmi les moins chères sur le marché et elle est d'un rendement économique amélioré grâce à l'utilisation de la biomasse végétale comme alternative crédible pour le traitement des eaux usées [11].

Les stations qui utilisent les plantes macrophytes sont très efficaces quant à l'élimination de la pollution carbonée et peuvent atteindre un rendement approchant les 95% et ce sur les principaux paramètres polluants (MES, DBO₅, DCO, l'azote et le phosphore) [12]. Les macrophytes peuvent retenir aussi, par assimilation, de 40 à 55 % des métaux [13].

Notre étude a pour but de tester les potentialités épuratoires du *Phragmites australis* (roseaux), qui est une plante macrophyte, à épurer une eau usée. La méthodologie utilisée prévoit la conception d'un dispositif adéquat mis en évidence. L'eau utilisée dans l'expérimentation est une eau prise dans un oued où les rejets d'une unité industrielle proche sont déversés. Parmi les polluants de cette dernière, il y a des métaux et en particulier des métaux lourds.

Ce manuscrit comprend cinq chapitres. Le premier est consacré à la présentation des généralités sur l'eau à savoir son origine, sa composition, sa classification et sa pollution. Le deuxième comporte les paramètres de qualité d'une eau permettant la connaissance du degré de pollution ainsi que la qualité et la quantité des substances polluantes. Quant au troisième chapitre, il est réservé à l'étude de la technique de traitement des eaux usées par les plantes macrophytes. Au quatrième chapitre on décrit les différentes étapes de la conception d'un dispositif adéquat à la réalisation des expériences. Le dernier chapitre est consacré à la présentation des résultats expérimentaux et à leurs interprétations. Notre mémoire se termine par une conclusion générale qui regroupe les résultats les plus intéressants et les perspectives que suggère cette étude.

Chapitre I

Généralités sur les eaux

Introduction

L'eau est indispensable à la vie. Elle constitue 70 % du poids du corps humain [14]. Elle se trouve presque partout sur la terre et est un composé essentiel pour tous les organismes vivants connus [15] : hommes, animaux et plantes, tous ont besoin de leur ration quotidienne d'eau [16].

Elle est utilisée pour de nombreux usages essentiels: la boisson, la préparation des repas, l'hygiène, l'entretien de l'habitation, les loisirs, la fabrication dans l'industrie, l'irrigation des cultures et l'abreuvement du bétail [14].

L'eau est si familière que l'on en oublie souvent l'importance et l'originalité. Elle doit à ses caractères physico-chimiques très particuliers son rôle de premier plan à la surface du globe, vis-à-vis non seulement de la biosphère, mais également de la lithosphère qu'elle modèle sans cesse. Sans l'eau, la terre ne serait qu'un astre mort, tout comme la Lune [17].


I – 1 – Cycle de l'eau

L'eau sous ses différents états physiques (gazeux, solide, liquide) suit un vaste cycle dans la nature.

Il existe une circulation de l'eau analogue à celle que provoquerait un gigantesque appareil distillatoire.

Le cycle se trouve donc fermé, ce qui se traduit par un bilan global exprimant l'égalité des pertes et des gains :

Précipitations = ruissellement + évaporation + transpiration + infiltration


 Évapotranspiration

- **Précipitation**

La vapeur d'eau atmosphérique se condense en nuages qui engendrent les précipitations sous forme de pluie, de neige ou de grêle. Ces précipitations constituent actuellement l'origine de presque toutes nos réserves en eau douce.

- **Ruissellement**

Parvenue sur le sol, une partie des précipitations s'écoule à sa surface vers le réseau hydrographique et les étendues d'eau libre (lacs, mers, océans), c'est le ruissellement de surface.

- **Evapotranspiration**

C'est la somme de toutes les pertes par transformation d'eau en vapeur.

➤ L'évaporation constituée par le retour direct de l'eau à l'atmosphère et qui est un

phénomène purement physique dépendant en particulier du déficit hygrométrique;

- La transpiration des plantes qui est égale au volume d'eau transitant par les plantes et nécessaire à leur croissance.

- **Infiltration**

Une partie des précipitations pénètre dans le sol et dans le sous-sol où elle alimente les eaux souterraines constituant le stock d'eau du sol et les réserves des nappes aquifères. Une partie de ces eaux souterraines retournera naturellement ou artificiellement à la surface du sol d'où elle participera à l'écoulement général ou à l'évapotranspiration.

Les éléments du bilan hydrologique peuvent être évalués localement dans des installations expérimentales appelées lysimètres qui utilisent le sol lui-même comme appareil de mesure [18].

I – 2 – Composition et structure d'une molécule d'eau

L'eau (que l'on peut aussi appeler *oxyde de dihydrogène*, *hydroxyde d'hydrogène* ou *acide hydroxyque*) est un composé chimique simple, mais avec des propriétés complexes à cause de sa polarisation. Sa formule chimique est H_2O , c'est-à-dire que chaque molécule d'eau se compose d'un atome d'oxygène entre deux atomes d'hydrogène. L'eau lourde est un composé formé d'un atome d'oxygène et de deux atomes de deutérium, qui est un isotope de l'hydrogène (oxyde de deutérium, D_2O) [15].

La molécule d'eau est constituée d'un édifice électronique stable, qualitativement semblable au néon, qui cependant ne réalise pas un équilibre électrique parfait.

En effet, à cause de l'électronégativité marquée de l'oxygène, et de sa tendance à accaparer les deux électrons d'hydrogène, il s'ensuit une déformation de la structure à l'origine des caractéristiques géométriques essentielles de la molécule d'eau, qui est dissymétrique et conforme au schéma angulaire de la figure I – 1 [18].

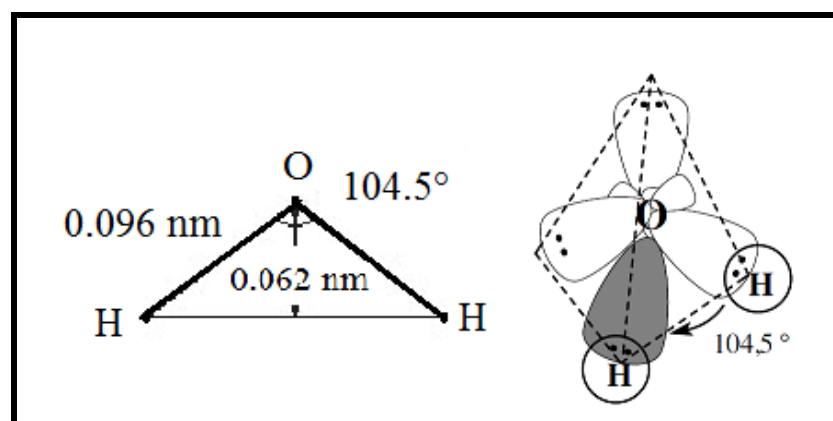


Figure I – 1 : Géométrie de la molécule H_2O .

I – 3 – Différents états de l'eau

Comme pour la plupart des corps, l'eau peut se présenter sous trois états ou phases : solide (glace), liquide (eau proprement dite), et gazeux (vapeur d'eau).

Ces trois phases coexistent dans la nature, toujours observables deux à deux, et plus ou moins en équilibre : eau- glace, glace- vapeur, eau- vapeur, selon les conditions de température et de pression. Il existe cependant un point, dit point triple (figure I – 2) pour lequel les trois phases sont rigoureusement en équilibre, à la température de 0,01 °C et sous une pression de 4,6 mmHg (613 Pa) [18].

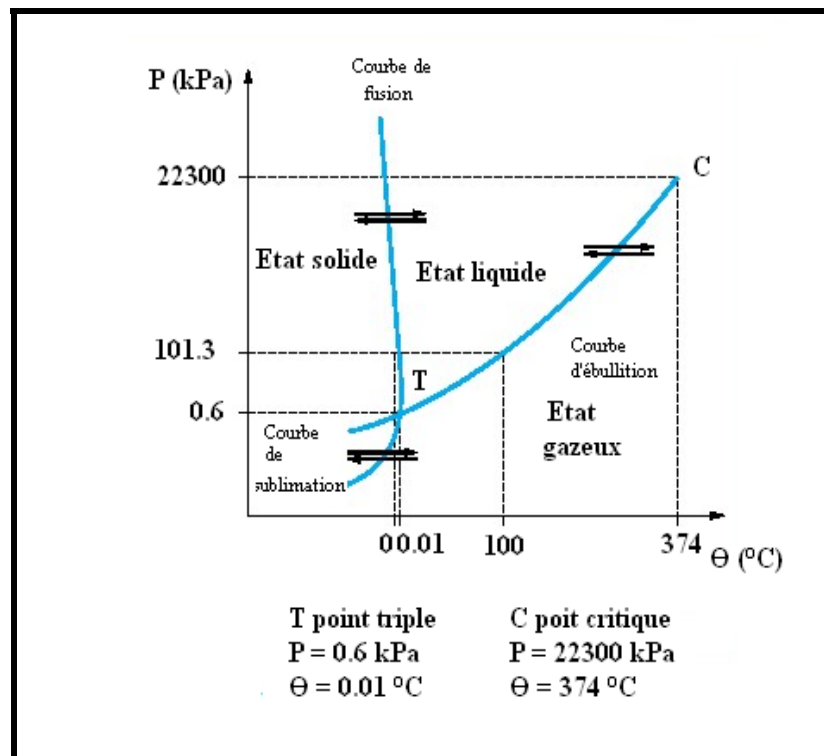


Figure I – 2 : Diagramme des phases de l'eau [18].

I – 4 – Classification des eaux

La classification des eaux diffère d'une référence à une autre, quelques unes les classifient suivant l'origine ; et certains autres s'intéressent à l'utilisation des eaux [20].

I – 4 – 1 – Eaux naturelles

I – 4 – 1 – 1 – Eaux de pluie

Les eaux de pluie sont des eaux de bonne qualité pour l'alimentation humaine. Elles sont saturées d'oxygène et d'azote et ne contiennent aucun sel dissous (elles sont très douces). Dans les régions industrialisées, les eaux de pluie peuvent être contaminées par les poussières

atmosphériques. La distribution des pluies dans le temps ainsi que les difficultés de captage font que peu de municipalités utilisent cette source d'eau [21].

I – 4 – 1 – 2 – Eaux souterraines

De point de vue hydrogéologique les couches aquifères se divisent en :

- **Nappes phréatiques ou alluviales** : Peu profondes et alimentées directement par les précipitations pluvieuses ou les écoulements d'eau en dessus,
- **Nappes captives** : Plus profondes que les premières et séparées de la surface par une couche imperméable, l'alimentation de ces nappes est assurée par l'infiltration sur leurs bordures.

La nature du terrain sous lequel se trouvent ces eaux est un déterminant de leurs compositions chimiques, cependant elles sont appelées aussi les eaux propres car ils répondent `en général` aux normes de potabilité. Pourtant, ces eaux sont moins sensibles aux pollutions accidentelles, elles perdent totalement leur pureté originale dans le cas de contamination par des polluants.

Quand une eau souterraine contient une concentration en certains minéraux dépassant les normes de potabilité, mais elle représente des propriétés thérapeutiques on la distribue en bouteilles avec parfois un traitement bien défini, ces eaux sont dites eaux minérales [20].

I – 4 – 1 – 3 – Eaux de surface

Ce type des eaux englobe toutes les eaux circulantes ou stockées à la surface des continents (rivières, lacs, étangs, barrages,...). La composition chimique des eaux de surface dépend de la nature des terrains traversés par ces eaux durant leurs parcours dans l'ensemble des bassins versants. Ces eaux sont le siège, dans la plupart des cas, d'un développement d'une vie microbienne à cause des déchets rejetés dedans et de l'importante surface de contact avec le milieu extérieur. C'est à cause de ça que ces eaux sont rarement potables sans aucun traitement [20].

Le tableau I – 1 récapitule les principales différences qui existent entre les eaux de surface par rapport aux eaux profondes (souterraines) [22].

Tableau I – 1 : Principales différences entre eaux de surface et eaux souterraines [22].

Caractéristique	Eaux de surface	Eaux profondes
Température	Variable suivant les saisons.	Relativement constante.
Turbidité (MES)	Variable parfois élevé.	Faible ou nulle
Minéralisation	Variable en fonction des terrains, des précipitations et des rejets.	Sensiblement constante, en général nettement plus élevée que les eaux de surface de la même région.
Fer et Manganèse se divalent (à l'état dissous)	Généralement absent sauf, au fond des pièces d'eau en état d'eutrophisation.	Généralement présent.
Gaz carbonique agressif	Généralement absent.	Souvent présent en grande quantité.
Oxygène dissout	Souvent au voisinage de la saturation.	Absent total dans la plupart du temps.
Ammoniac	Seulement dans les eaux polluées.	Présent fréquente sans être un indice de pollution.
Sulfure d'hydrogène	Absent.	Souvent présent.
Silice	Teneur modérée.	Teneur souvent élevée.
Nitrates	Peu abondant en général.	Teneur parfois élevée.
Éléments vivants	Bactéries (dont certains pathogènes, virus, plancton).	Ferro bactéries fréquentes.
Polluants et micropolluants organiques et minéraux liés à l'activité humaine	Risque important.	Risque faible.

I – 4 – 1 – 4 – Eaux des mers et océans

Les mers et les océans constituent des énormes réservoirs d'eau, elles représentent près de 97.4% du volume d'eau existant actuellement sur notre planète, le reste est la part des eaux continentales (eaux souterraines et superficielles). Les eaux de mers sont caractérisées par une grande salinité, elles sont dénommées aussi « eaux saumâtres », ce qui rend leur utilisation difficile, notamment leur coût très élevé pour leur traitement [20].

I – 4 – 2 – Eaux de consommation

Ce sont les eaux destinées à la consommation domestique, elles ont connues une énorme croissance suite au développement démographique et à l'amélioration des conditions de vie des populations. La consommation domestique en eau varie de quelques litres par jour dans les pays sans adduction publique et à faible confort ménager jusqu'à plusieurs centaines de litres dans les pays très développés. Même si ce n'est qu'une petite quantité qui va être bu,

jamais ces eaux ne sont distribuées qu'après traitement, trois facteurs déterminent le choix d'un traitement:

- **La quantité** : La source doit couvrir la demande, en toute circonstance.
- **La qualité** : La qualité de l'eau brute dont on dispose doit être compatible avec la législation en vigueur.
- **L'économie** : Le coût d'investissement et de fonctionnement du procédé de traitement relatif à chacune des ressources disponibles est déterminant lors de la prise d'une décision. Il faut signaler que les établissements distributeurs des eaux de consommation sont responsables de la conformité de ces eaux aux normes jusqu'à leurs arrivées au consommateur [20].

I – 4 – 3 – Eaux industrielles

La qualité et la quantité des eaux utilisées dans l'industrie sont très variables, elles dépendent du type de l'entreprise productrice et de sa taille (voir tableau I – 2). Une eau qui va entrer dans un cycle de refroidissement d'une chaudière est moins exigeante que l'eau utilisée dans l'industrie électronique [20].

Tableau I – 2 : Principales utilisation industrielles de l'eau et sources d'eau possibles [20].

Utilisation		Sources d'eau acceptables (souvent après un traitement adéquat)
Eau de fabrications Nobles	- Agroalimentaire - Pharmacie - Papiers blancs - Textiles - Teintureries - Chimie	- Eau moyennement minéralisée - Eau potable - Eaux de forage - Eaux de surface peu polluées
Eau déminéralisée	- Pharmacie - Chaudières - Préparation des bains divers - Rinçages en galvanoplastie - Eau ultra pure - Dessalement par osmose inverse	- Eaux de forage - Eaux de surface peu polluées.
Eau de refroidissement en circuit semi-ouvert	- Réfrigération atmosphérique	- Eaux de surface pauvres en Cl ⁻ - Effluents après traitement tertiaire
Eau de refroidissement en circuit ouvert	- Condenseurs et échangeurs	- Eaux de surface - Eaux de mer - Effluents après traitement
Eau de lavage de gaz ou produit de transport	- Lavage gaz métallurgique et incinération - Lavage charbon	- Eaux de surface tamisées et prédécantées - Effluents secondaires

I – 4 – 4 – Eaux usées

L'utilisation des eaux engendre un nouveau produit appelé effluent ou eau usée.

Les problèmes liés aux eaux usées sont aussi anciens que ces eaux elles même et ils s'aggravent suivant la croissance démographique, l'amélioration de la qualité de vie des populations et le développement des activités industrielles.

Les eaux usées se divisent en deux grandes catégories : les eaux résiduaires urbaines (ERU) et les eaux résiduaires industrielles (ERI) [20].

I – 4 – 4 – 1 – Eaux résiduaires urbaines

Les eaux résiduaires urbaines (ERU) regroupent les eaux ménagères, les eaux vannes et les eaux ruissellement. La composition et les caractéristiques d'une eau résiduaire urbaine sont peu variables par rapport aux eaux usées industrielles (voir figure I – 3) [20].

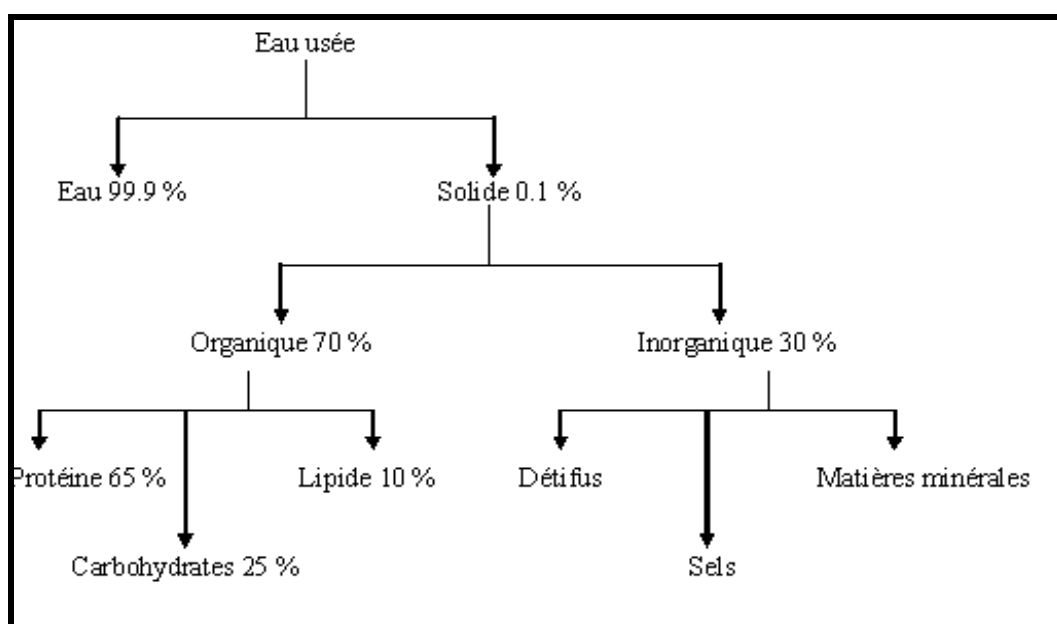


Figure I – 3 : Composition d'une eau usée domestique [20].

I – 4 – 4 – 2 – Eaux résiduaires industrielles

Les caractéristiques des eaux usées industrielles subissent des grandes variations, elles dépendent à une multitude de paramètres types de l'industrie, production, nettoyage, etc. les différentes étapes du procédé industriel, l'état des appareils, etc. Par ailleurs, il existe des caractéristiques communes entre les effluents de la même industrie.

En terme de volume et type de polluants, les effluents industriels présentent le plus souvent une charge importante et un risque de dysfonctionnement structurel et fonctionnel des réseaux

d'assainissement et des dispositifs de traitement des eaux usées. Ces risques sont d'autant plus grands que les industries sont localisées en amont du réseau d'assainissement [20].

I – 5 – Les principaux constituants des eaux naturelles

I – 5 – 1 – Les composés minéraux

Les composés minéraux présents dans les eaux naturelles trouvent essentiellement leur origine dans les échanges qui se produisent entre l'eau et le sol, entre l'eau et l'atmosphère. Ils résultent aussi de métabolisme des éléments constitutifs de la biomasse aquatique [23].

I – 5 – 1 – 1 – Les gaz dissous

L'eau naturelle, lorsqu'elle est en contact avec l'air, peut dissoudre les gaz de l'atmosphère. La proportion de chacun d'entre eux dans l'air, leur solubilité respective, la température ainsi que la turbulence de l'eau ou de la vitesse du vent, influent sur ce transfert à travers l'interface eau-air. Mais c'est souvent l'activité biologique qui conditionne les concentrations des gaz dissous.

Le taux d'oxygène dissous dans une eau détermine directement la nature de l'écosystème aquatique ; c'est l'un des paramètres les plus sensibles à l'apport de la pollution organique dans un cours d'eau. La solubilité de l'oxygène dans l'eau diminue lorsque la température augmente.

Le gaz carbonique ou dioxyde de carbone est naturellement présent dans l'atmosphère ; il est très soluble dans l'eau, beaucoup plus que l'oxygène. Le CO₂ dissous intervient dans le goût de l'eau mais surtout comme élément majeur du système calcocarbonique qu'il joue un rôle essentiel dans l'équilibre physico- chimique des eaux.

L'azote, constituant majoritaire de l'air, se trouve également à l'état dissous dans les eaux naturelles. Chimiquement plus réactif il est cependant fixé par certains éléments bactériens ou par certaines algues qui le transforment en azote organique [23].

I – 5 – 1 – 2 – Les électrolytes minéraux

La nature chimique des terrains conditionne la composition électrolytique des eaux naturelles. Il en résulte des qualités d'eaux extrêmement variées.

On peut classer les constituants minéraux en deux catégories :

- **Les éléments fondamentaux** : Ce sont ceux que l'on retrouve dans toute les eaux naturelles ; ils représentent le système calcocarbonique associé aux ions issus de la

dissociation de l'eau ; ils sont en nombre de six : H_2CO_3 , HCO_3^- , CO_3^{2-} , Ca^{++} , OH^- et H^+ . Leur présence découle de la dissolution dans l'eau du gaz carbonique et du passage en solution sous l'effet de l'acide carbonique du carbonate de calcium.

- **Les éléments caractéristiques** : regroupent l'ensemble des autres ions minéraux qui résultent aussi souvent de l'action dissolvante de l'acide carbonique (Mg^{++} , Fe^{++} , Mn^{++} , Al^{+++} , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , etc.). Parmi les éléments caractéristiques se situent enfin tous les éléments à l'état de traces plus ou moins importants qui peuvent jouer un rôle au niveau d'effet toxique (ou thérapeutique) éventuel de l'eau [23].

I – 5 – 2 – Les composés organiques

Les matières organiques naturellement présentes dans les eaux, sont formées par un mélange complexe de produits végétaux ou animaux à des stades de décomposition variés. Elles comprennent également des produits de synthèse, par voie chimique ou biochimique, élaborés à partir de ces éléments. Elles comprennent enfin des microorganismes (bactéries, virus, etc.) et leurs produits de décomposition. On peut les classer en deux catégories :

- **Les substances non humiques** : Sont formées par des produits de base : protéine et acides aminés, polysaccharides et sucres simples, graisse et acides gras, hydrocarbures, pigments, vitamines et toxines diverses. Elles sont généralement peu importantes car elles sont bien dégradées et utilisées dès leur apparition dans l'eau par les microorganismes présents ; leur renouvellement est très rapide.
- **Les substances humiques** : Constituent l'essentiel des matières organiques des eaux naturelles. Elaborées par les microorganismes (bactéries, champignons) à partir des produits végétaux et animaux, elles résistent bien à la décomposition bactérienne et demeurent stables pendant de longues périodes dans les systèmes aquatiques. Elles consistent en complexes amorphes souvent colorés en brun ou en noir, hydrophiles et acides, on les fractionne par voie chimique [23].

I – 6 – Caractéristiques des eaux

I – 6 – 1 – Propriétés physiques de l'eau

Les valeurs des principales constantes physiques de l'eau sont rassemblées dans le tableau I – 3.

Tableau I – 3 : Principales constantes physiques de l'eau pure [18].

Eau liquide	<ul style="list-style-type: none"> - Température d'ébullition sous 760 mm Hg - Capacité thermique massique à 15 °C - Enthalpie de vaporisation à 100 °C - Conductivité thermique à 20 °C - Résistivité à 20 °C - Permittivité relative ϵ à 20 °C - Indice de réfraction pour la raie D à 10 °C - Masse volumique à 4 °C 	<ul style="list-style-type: none"> 100 °C 4.1868 J . g⁻¹ 2252.5 J . g⁻¹ 5.98 mW . cm⁻¹ . K⁻¹ 23.8 MΩ . cm 80 1.33300 1 g . cm⁻³ (par définition)
Eau solide	<ul style="list-style-type: none"> - Température de fusion - Capacité thermique massique - Enthalpie e fusion sous 760 mm Hg - Tension de vapeur à 0 °C - Permittivité relative ϵ - Indice de réfraction pour la raie D - Densité (par rapport à l'eau à 0 °C) 	<ul style="list-style-type: none"> 0 °C (par définition) 2.0934 J . g⁻¹ 333.27 J . g⁻¹ 877.128 Pa 3.26 1.30907 0.91649 \pm 0.0007
Eau vapeur	<ul style="list-style-type: none"> - Conductivité thermique à 100 °C - Densité par rapport à l'air - Indice de réfraction pour la raie D à 100 °C 	<ul style="list-style-type: none"> 0.231 Mw . cm⁻¹ . K⁻¹ 0.62337 1.00259

- **Température d'ébullition**

Anormalement élevée, si on la compare avec celle de composés de masse moléculaire du même ordre, possédant plusieurs atomes d'hydrogène.

- **Masse volumique**

Elle varie avec la température et la pression, mais aussi avec la teneur en sels dissous.

- **Viscosité**

Elle diminue lorsque la température croît ; par contre, elle augmente avec la teneur en sels dissous. Contrairement aux autres liquides, une pression modérée, rend l'eau moins visqueuse aux basses températures.

- **Tension superficielle**

Elle est extrêmement ; égale à 73×10^{-3} N/m à 18 °C et 52.5×10^{-3} N/m à 100 °C. L'addition de sels dissous augmente généralement la tension superficielle, les tensioactifs par contre la diminuent.

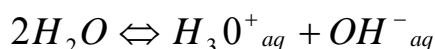
- **Permittivité relative ϵ**

Elle est particulièrement élevée $\epsilon = 80$ (à 20 °C) par rapport à d'autres liquides. C'est ce qui explique le pouvoir ionisant très important de l'eau [18].

- **Conductivité électrique de l'eau**

La conductivité électrique d'une eau correspond à la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes métalliques de 1 cm² de surface et séparées l'une à l'autre de 1cm. L'unité de la conductivité est le micro-Simens par centimètre (μ S/cm) [24].

L'eau est légèrement conductrice. Cette conductivité très faible mais jamais nulle de l'eau est expliquée par une légère dissociation de la molécule d'eau en ions selon l'équation chimique :



Cet équilibre est caractérisé quantitativement par sa constante d'équilibre ou produit ionique : $Ke = [H_3O^+_{aq}] \times [OH^-_{aq}]$

Avec $[H_3O^+_{aq}]$ et $[OH^-_{aq}]$ concentration molaire en ions.

Dans le cas de l'eau pure, la fraction des molécules ainsi dissociées est extrêmement faible, comme l'indique la valeur de la constante d'équilibre de dissociation qui varie, par ailleurs, de façon notable avec la température : [18]

$$\text{à } 20 \text{ }^\circ\text{C} \quad [H_3O^+_{aq}] \times [OH^-_{aq}] = 10^{-14}$$

$$\text{et} \quad [H_3O^+_{aq}] = [OH^-_{aq}]$$

$$\text{d'où} \quad [H_3O^+_{aq}] = \sqrt{Ke} = 10^{-7}$$

Ce qui permet de définir la notion de PH (grandeur sans unité) par la relation :

$$pH = -\lg[H_3O^+_{aq}] = 7$$

Ou ce qui est équivalent par la relation :

$$[H_3O^+_{aq}] = 10^{-pH}$$

I – 6 – 2 – Propriétés chimiques de l'eau

L'eau est, par ses propriétés électriques et sa constitution moléculaire, particulièrement apte à la mise en solution de nombreux corps gazeux, liquides polaires, et surtout solides.

La solvation (ou action hydratante de l'eau) est le résultat d'une destruction complète ou partielle des divers liens électrostatiques entre les atomes et les molécules du corps à dissoudre, pour les remplacer par de nouveaux liens avec les molécules d'eau, et forger ainsi de nouvelles structures : il se produit une véritable réaction chimique.

Une solvation complète est une dissolution.

Si la solvation s'exerce sans que la matière se disperse spontanément dans l'eau, on tend vers une peptisation qui correspond à la solution colloïdale.

Si la solvation n'est que superficielle, on obtient une suspension colloïdale ou une gelée, suivant que le corps est mouillable ou gonflable (hydrophilie).

La dissolution des corps minéraux engendre une ionisation, c'est-à-dire la dissociation des molécules formant le cristal minéral, avec apparition d'ions chargés électriquement dotés d'une certaine mobilité en solution. En effet si on produit un champ électrique continu, les ions vont se déplacer (vers la cathode pour les cations + et vers l'anode pour les anions -) en provoquant le passage d'un courant [18].

I – 6 – 3 – Propriétés biologiques de l'eau

L'eau, l'oxygène et le dioxyde de carbone contribuent à créer des conditions favorables au développement des êtres vivants.

Il existe un cycle biologique, cycle au cours duquel s'effectue une série d'échanges. L'eau entre pour une grande part dans la constitution des êtres vivants. Pour l'homme, on cite les pourcentages suivants :

- nouveau-né 66 à 74 %
- adulte 58 à 67 %

L'eau compose la plus grande partie de nos aliments :

- laitue 92 %
- pomme de terre 78 %
- poulet..... 72 % [18].

I – 7 – La pollution des eaux

I – 7 – 1 – Définition de la pollution des eaux

La pollution des eaux est définie comme une modification des caractéristiques naturelles de celle-ci et elles nécessitent un traitement pour qu'en peut l'utilisées. Ces éléments indésirables proviennent des excréments chimiques, des rejets provenant d'industries divers et du lessivage des terrains traversés. Le problème de la pollution des eaux représente la cause majeure de la diminution des ressources d'eau potable dans le monde.

La pollution des eaux est toute modification des propriétés physiques, chimiques ou biologiques, ou tout rejet de substances liquides, gazeuses ou solides dans l'eau de façon à créer une nuisance ou à rendre cette eau dangereuse ou préjudiciable du point de vue, soit de la santé, de la sécurité et du bien être publique, soit de ses usages destinés à des fins domestiques, commerciales, industrielles, agricoles, récréatives et autres, soit de la faune sauvage et aquatique [25].

I – 7 – 2 – Les différentes origines de la pollution des eaux

L'eau est une ressource indispensable aux activités humaines et pour tout organisme vivant.

La pollution de l'eau se traduit par une dégradation des caractères physiques, chimiques, biologiques ou bactériologiques.

L'origine des substances polluantes est diverse. Ainsi, on distingue les pollutions d'origine domestique, industrielle, issues des phénomènes naturels [26], la pollution par les eaux pluviales et la pollution par les substances associées au traitement des eaux.

I – 7 – 2 – 1 – Pollution d'origine domestique

Les rejets domestiques, les eaux usées des habitations et des commerces entraînent la pollution urbaine de l'eau, elle est liée aux grandes concentrations urbaines. Les polluants urbains sont représentés par les déchets domestiques, les eaux d'égouts et de tous les produits dont se débarrassent les habitants d'une agglomération.

On trouve les excréments, les restes d'aliments, les déversements d'abattoirs, les déversements hospitaliers, les lessives, les détergents, les insecticides, les hydrocarbures, les déchets de la petite industrie et divers produits toxiques [27].



Figure I – 4 : Pollution domestique de l'eau.

I – 7 – 2 – 2 – Pollution d'origine industrielle

Les usines sont toujours implantées au bord de l'eau (rivière, canal ou mer) pour des raisons diverses ; l'eau réunit un ensemble exceptionnel de propriétés physiques et chimiques; elle peut devenir solvant, fluide thermique ou simplement liquide facile à manipuler. Ces propriétés expliquent pourquoi l'eau est impliquée dans toutes les grandes activités industrielles ; les usines utilisent l'eau de manière répétée au cours des stades successifs de la chaîne de fabrication.

En effet, toute activité industrielle engendre des rejets polluants [19]; notamment de tanneries (cadmium, chrome), de papeteries (mercure), d'usines de fabrication de chlore (mercure) et d'usines métallurgiques ; [16] qui renferment tous les sous-produits et les pertes de matières premières qui n'ont pu être récupérées ni recyclées [19].



Figure I – 5 : Pollution industrielle de l'eau.

I – 7 – 2 – 3 – Pollution d'origine agricole

L'agriculture, l'élevage et l'aviculture sont responsables du rejet de nombreux polluants organiques et inorganiques dans les eaux de surface et souterrains. Ces contaminants comprennent à la fois des sédiments provenant de l'érosion des terres agricoles, des composés phosphorés ou azotés issus des déchets animaux et des engrais commerciaux, notamment des nitrates [25].



Figure I – 6 : Pollution agricole.

- **Utilisation des engrais en agriculture**

La modernisation de l'agriculture et son intensification ont été généralement accompagnées d'une utilisation abusive et non rationnelle des engrais azotés et phosphatés. Il est admis qu'une fertilisation minérale se solde par un accroissement des rendements mais les doses élevées appliquées, généralement supérieures aux besoins réels des cultures, génèrent des excès d'azote qui peuvent entraver la production agricole par plusieurs mécanismes et polluer l'environnement. Au total, les excès d'azote contaminent entre autres les eaux souterraines et menacent la santé humaine et animale.

- **Utilisation des pesticides en agriculture**

Les pesticides sont utilisés en agriculture pour protéger les cultures et les récoltes contre leurs ennemis afin d'augmenter les rendements.

Le lessivage de ces produits phytosanitaires utilisés en agriculture entraîne la contamination des eaux des nappes par des substances toxiques (pesticides).

Chez l'Homme, l'ingestion de doses excessives de nitrates dans l'eau de boisson provoque ce qu'on appelle la maladie du sang bleu ou méthémoglobinémie constatée en 1945 aux USA et après en Europe [25].

I – 7 – 2 – 4 – Pollution d'origine naturelle

Cette pollution est due a des substances contaminent l'eau présentes naturellement dans l'environnement, leurs origine est des roches qui environnants ces eaux, soit les eaux de surfaces ou souterraines. Ces substances sont inorganiques comme le baryum, l'arsenic, les fluorures, le sodium, les chlorures, le mercure, le cadmium... [28].

I – 7 – 2 – 5 – Pollution par les eaux pluviales

La pollution de l'air influence sur la qualité de l'eau des pluies, les fumées industrielle, les poussières et les résidus d'échappement des véhicule peuvent contaminée l'eau pluviales [25].

I – 8 – Les principaux polluants des eaux naturelles

I – 8 – 1 – Polluants physiques

Les polluants physiques sont les éléments solides entraînés par l'eau. On parle de ce type de pollution quand l'eau est modifiée dans sa structure physique C'est une pollution due aux décharges des déchets et des particules solides apportés par les eaux de ruissellement. Elle provient aussi des opérations de dragage et de l'érosion. Les polluants solides rejetés dans le milieu aquatique peuvent être classés selon leur nature et leur taille [29].

- **Selon leur dimension** : l'état dispersé que l'on peut diviser en suspension et état colloïdal, se distinguent de état dissout, notamment par les dimensions particulières.

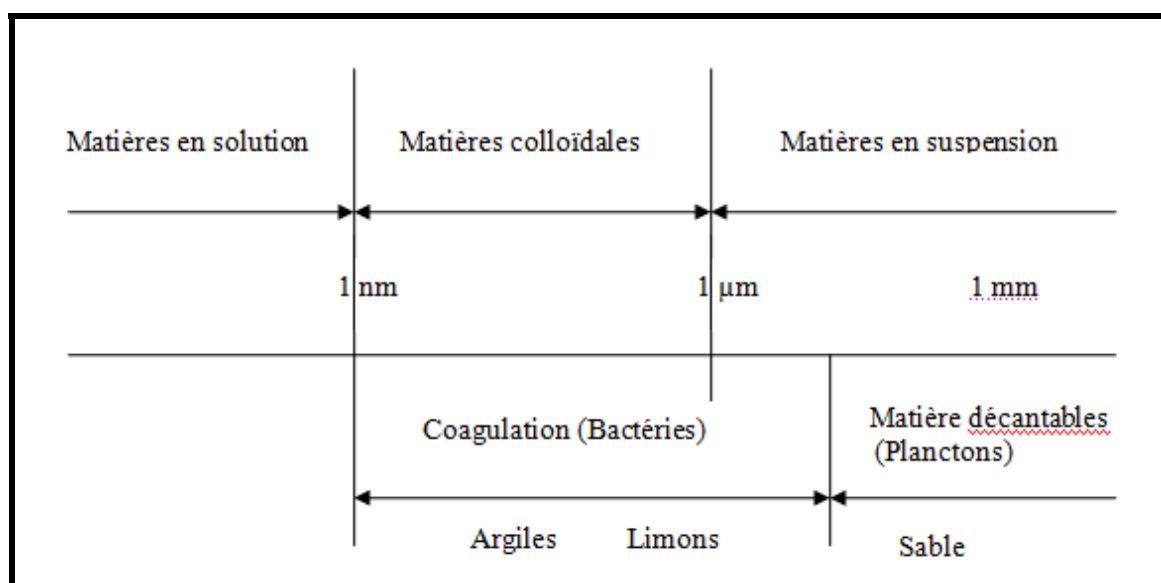


Figure I – 7 : Les polluants physiques, échelle de dimensions et états correspondants [29].

- **Selon leur nature** : leur nature divise soit minérale ou organique, pour les polluants minéraux provoques une pollution par leurs volumes ou par leurs dépôts, ainsi qu'ils colmatent les sols et les asphyxies. Les polluants organiques ont besoin d'oxygène pour qu'ils évoluent et dégageront des odeurs par putréfaction.

Les polluants solides rejetés dans le milieu aquatique peuvent être réparti en :

- **Les éléments grossiers**

On les trouve généralement dans les eaux de surface. Leur taille est suffisamment grande pour qu'ils soient retenus par une simple grille. Ces éléments sont généralement des brindilles, des feuilles, des arbres...etc.

- **Les sables**

Les sables sont des particules minérales une certaines tailles, ils sont à base de silice ou de composition minérale équivalente. Leur masse spécifique est de 2,5 à 2,6 g/l, Leur élimination se fait par une simple décantation [30].

- **Les matières en suspensions (MES)**

Les matières en suspension sont les impuretés qui à cause de leur taille (supérieure à 10µm) leur séparation –élimination- demande une décantation lente ou un filtration. On les trouve essentiellement dans les eaux superficielles [29].

Elles contribuent à la turbidité de l'eau [26] et à sa couleur [22].

Elles peuvent être d'origine minérale (quartz, sels minéraux insolubles, limons, argiles, ...) ou organique (produits de la décomposition des matières végétales ou animales, acides humiques). A ces composés s'ajoutent les micro-organismes tels que bactéries, plancton, algues et virus [22].

- **Matières colloïdales**

Ce sont des MES de même origine que les précédentes mais de plus petite taille (moins de 1 micron). Elles sont également génératrices de turbidité et de couleur. Aussi, leur élimination dans l'eau à traitée est difficile car elles ne se décantent pas de manière spontanée et sont peu retenues par filtres, on devra utiliser la coagulation-floculation suivie par une décantation pour éliminer les colloïdes [22].

I – 8 – 2 – Polluants chimiques

Ces polluants sont des rejets de produits chimiques à la fois d'origine industrielle et domestique. Le danger de ces polluants dépend de leur nature biochimique. Certains sont hydrosolubles, facilement dilués et donc leur action est minime. D'autres sont liposolubles

avec un pouvoir de se concentrer au niveau des lipides et par conséquent, ils vont emprunter la chaîne trophique [25].

Ces polluants sont de deux catégories :

I – 8 – 2 – 1 – Polluants chimiques organiques

Les matières organiques dans les eaux sont les produits de la dégradation des matières animales ou végétales par les micro-organismes. Les activités humaines constituent une source de pollution organique importante.

On y associe les rejets domestiques, les rejets industriels et les activités agricoles (épandage, pesticides). Par voie biologique, la matière organique naturelle ou de synthèse peut être dégradée. Certains produits intermédiaires peuvent s'avérer toxiques.

Au stade ultime de la minéralisation (rapport C/N), la matière organique est transformée en azote, en phosphore, en dioxyde de carbone [26].

I – 8 – 2 – 2 – Polluants chimiques inorganiques

a – Métaux lourds

On appelle en général métaux lourds les éléments métalliques naturels, métaux ou dans certains cas métalloïdes caractérisés par une masse volumique élevée, supérieure à 5 grammes par cm^3 .

Les métaux lourds sont des micropolluants de nature à entraîner les nuisances même quand ils sont rejetés en quantités très faibles (leur toxicité se développe par bioaccumulation). D'ailleurs, de petites quantités en proportion (mesurées en microgrammes par litre) sont souvent compensées par un effet volume compte tenu de l'importance des débits d'eau [31].

La présence des métaux lourds dans l'eau, est certainement le cas le plus intéressant parmi les problèmes posés par la pollution de l'environnement. En effet, le plomb, le cadmium et le mercure, développés à la fin de la deuxième révolution industrielle, sont les métaux lourds les plus redoutables, susceptibles d'être métabolisés et concentrés au niveau des organismes humains [25]

b – Substances indésirables

Il s'agit des substances qui sont normalement dans l'eau à des concentrations très faibles, tel que le fer, le manganèse, le zinc, le cuivre, etc. Elles sont appelées aussi des «

oligo-éléments ». Elles deviennent des substances polluantes quand leur concentration augmente, par conséquent, elles vont altérer l'eau et ses constituants [25].

c – Substances à concentration excessive

Ce sont des substances qui deviennent polluantes lorsque leurs concentrations dans l'eau varient, certaines quand leur concentration augmente et d'autres quand elle diminue tel que les nitrates, les sulfates, etc. [25].

I – 8 – 3 – Polluants biologiques

Dans la nature, l'eau véhicule en particulier nombre de micro-organismes, bactéries, virus et protozoaires en tout genre, qui y vivent et s'y développent, ainsi que nombre de parasites dont les hôtes ont besoin d'eau pour vivre ou se reproduire. Or de tels organismes peuvent engendrer des maladies parfois graves lorsqu'ils pénètrent dans le corps humain.

L'eau est ainsi le vecteur de transmission privilégié de nombreuses maladies [32] ; elle doit être donc traitée avant leur utilisation ou consommation.

Conclusion

Une vie humaine digne ne peut s'en passer d'une eau de bonne qualité, car l'eau est la vie. L'eau naturelle est celle en particulier de surface contient plusieurs substances telles que les bactéries, les algues, les substances organiques et autres dont l'origine est ou bien naturelle ou de pollution. Pour certaines doses de ces derniers, cette eau devient d'une consommation dangereuse.

Chapitre II

Paramètres de qualité de l'eau

Introduction

L'eau est un élément essentiel au fonctionnement de tout écosystème, mais aussi des activités humaines (agriculture, industrie) et de notre vie de tous les jours (usage domestique, loisirs) [33] ; elle est considérée comme une matière première, qui va être transformée, élaborée, pour devenir conforme aux normes définies par la réglementation.

L'exigence de la qualité se manifeste dès la première étape, au moment du choix de l'eau brute dont les eaux brutes dépendent du contexte géographique, hydrographique et économique (région agricole, urbaine ou industrielle) [34].

Les caractéristiques de qualité de l'eau nous indiquent le degré de pollution de cette eau, et la quantité et la qualité des substances dangereuses pour la santé humaine [35].

II – 1 – Paramètres organoleptiques

Ces paramètres sont l'odeur, la couleur, le goût et la turbidité [36]; ils doivent être appréciés au moment du prélèvement : certaines odeurs peuvent, par exemple, disparaître pendant le transport, ou l'aspect de l'échantillon se modifier au cours du stockage (apparition d'une coloration, de précipités, etc.) [37].

II – 1 – 1 – Odeur

L'odeur peut être définie comme l'ensemble des sensations perçues par l'organe olfactif en flairant certaines substances volatiles.

Une eau destinée à l'alimentation doit être inodore. En effet, toute odeur est un signe de pollution ou de la présence de matières organiques en décomposition. Ces substances sont en général en quantité si minime qu'elles ne peuvent être mises en évidence par les méthodes d'analyse ordinaire. Le sens olfactif peut seul, dans une certaine mesure, les déceler [37].

Tout odeur dans l'eau est causée par la présence des substances relativement volatiles, soit substances inorganiques comme le chlore, les hypochlorites, le bioxyde de soufre (SO_2) ou le sulfure d'hydrogène (H_2S), ou substances organiques comme les esters, les alcools, les dérivées aromatiques et de composés résultant de la décomposition de matières animales ou végétales (les algues), encore du à la pollution [35].

L'odeur est mesurée par comparaison à une solution de référence (platine cobalt), et exprimée en degré platine cobalt ou encore appelée degré HAZEN [38].

II – 1 – 2 – Couleur

La coloration d'une eau est dite vraie ou réelle lorsqu'elle est due aux seules substances en solution. Elle est dite apparente quand les substances en suspension y ajoutent leur propre coloration. Les couleurs réelle et apparente sont approximativement identiques dans l'eau claire et les eaux de faible turbidité [37].

L'eau potable examinée sous une épaisseur moyenne de 20 cm est incolore ; sous une épaisseur de quelque mètres, l'eau pure à une coloration bleue, et en fonction de la turbidité, de la présence de plancton et des matières en solution (acide humique, fer, manganèse, rejets industriel, etc.), elle pourra virer en vert, jaune ou brune.

Bien que l'eau colorée puisse ne pas être dangereuse, elle présentera des inconvénients et sera suspecte au consommateur [38].

Une eau destinée à la consommation humaine ne doit pas présenter une coloration dépassant 15 mg/l de platine en référence à l'échelle Platine/Cobalt [23].

II – 1 – 3 – Goût

Le goût peut être défini comme l'ensemble des sensations gustatives, olfactives et de sensibilité chimique commune perçue lorsque l'aliment ou la boisson est dans la bouche.

La saveur peut être définie comme l'ensemble des sensations perçues à la suite de la stimulation, par certaines substances solubles des bourgeons gustatifs.

La flaveur peut être définie comme l'ensemble des sensations perçues par l'organe olfactif, les bourgeons gustatifs et la cavité buccale auxquelles peuvent s'ajouter des sensations thermiques, tactiles, chimiques, kinésiques, douloureuses, etc. [37].

La saveur de l'eau potable doit être agréable ; dans les eaux de surface, la saveur désagréable est due essentiellement à la présence des algues, des champignons et des produits chimiques, un goût métallique est parfois donné par des sels ferreux [39].

Certaines eaux naturelles peuvent être fades. La fadeur d'une eau est souvent accompagnée d'une odeur de croupi et on doit songer à la présence probable des matières organiques.

L'amertume est souvent, la preuve de la présence des sels de manganèse de même qu'une saveur séléniteuse due à la présence des doses importantes de sulfates (sulfate de calcium et de manganèse).

Il n'existe aucun appareil pour mesurer la saveur [38].

II – 1 – 4 – Turbidité

Elle définit l'opalescence d'une eau [40], Une eau turbide est une eau trouble. Cette caractéristique vient de la teneur de l'eau en particules en suspension, associées au transport de l'eau. Au cours de ce parcours, l'eau se charge de quantités énormes de particules, qui troublent l'eau. Les matières mêlées à l'eau, sont de natures très diverses : matières d'origine minérale (argile, limon, sable...), micro particules, micro-organismes [2].

Toutes les eaux sont turbides mais, une turbidité trop importante provoque un rejet de la part des utilisateurs et doit être éliminée aussi pour autres raisons :

- Permettre une bonne désinfection de l'eau ;
- Eliminer tout polluant adsorbé sur les matières en suspension (métaux lourds) ;
- Eviter tout dépôt dans le réseau de distribution.

La turbidité empêche la propagation de la lumière, elle est déviée dans toutes les directions, de ce fait, la photosynthèse n'a pas lieu dans les eaux profondes [38].

La turbidité peut être évaluée par un certain nombre de méthodes qui sont pratiquées suivant les nécessités sur le terrain ou au laboratoire. Certaines méthodes comme celle "des gouttes de mastic» ou celle de Jackson ("candie turbidimètr") n'ont plus qu'un intérêt historique, ayant été remplacées par l'emploi des turbidimètres optiques.

Il est recommandé d'effectuer la mesure aussi rapidement que possible après le prélèvement, de préférence le même jour [37].

Selon l'extrait des valeurs guides de l'O.M.S. 1998 pour les principaux paramètres caractérisant les eaux de consommations (Qualité physico-chimique) ; la valeur indicative de la turbidité est de 5 NTU (unité néphélobométrique de turbidité) [41]

II – 2 – Paramètres physicochimiques

II – 2 – 1 – Température

Il est important de connaître la température de l'eau avec une bonne précision. En effet, celle-ci joue un rôle dans la solubilité des sels et surtout des gaz, dans la dissociation des sels dissous donc sur la conductivité électrique, dans la détermination du pH, pour la connaissance de l'origine de l'eau et des mélanges éventuels, etc.

La mesure de la température est à effectuer sur le terrain. Pratiquement la température de l'eau est mesurée soit avec un appareil électrométrique soit avec un thermomètre précis, gradué au 1/10 de degré et étalonné [37].

L'O.M.S (Organisation Mondiale de la Santé) ne donne pas de valeur guide concernant la valeur de la température [41].

Une température supérieure à 15°C favorise le développement des micro-organismes en même temps qu'elle peut intensifier les odeurs et les saveurs, par contre, une température inférieure à 10°C ralentit les réactions chimiques.

L'élévation de la température s'accompagne d'une modification de la densité de l'eau (la densité décroît lorsque la température croît), d'une réduction de la viscosité, d'une augmentation de la tension de la vapeur saturante à la surface (évaporation) et une diminution de la solubilité des gaz (oxygène).

L'augmentation de la température favorise aussi l'auto épuration et accroît la vitesse de sédimentation, ce qui peut présenter un intérêt dans les stations d'épuration. Elle peut favoriser la mortalité de certaines espèces et le développement d'autres [38].

II – 2 – 2 – Le pH

Le pH (potentiel hydrogène) est une des caractéristiques fondamentales de l'eau [2] représente son acidité ou son alcalinité [38]. Il est déterminé à partir de la quantité d'ions d'hydrogène hydronium (H^+) ou d'ions hydroxyde (OH^-) contenus dans la substance. Quand les quantités de ces deux ions sont égales, l'eau (ou la substance) est considérée comme neutre et le pH a une valeur aux alentours de 7.

Le pH d'une substance varie entre 1 et 14. Au-dessus de 7, la substance est considérée comme basique et la quantité d'ions OH^- est supérieure à celle d'ions H^+ . Au-dessous de 7, la substance est acide ; les ions H^+ sont en quantités supérieures [2].

Lorsque le pH est supérieur à 8 il y a diminution progressive de l'efficacité de la décontamination microbienne par le chlore [41].

Le pH est un paramètre important car, il influe sur le goût de l'eau et les réactions chimiques [38]. Il agit indirectement sur la santé dans la mesure même où il influe sur les différents procédés du traitement destiné à éliminer les virus, les bactéries et autres organismes nocifs.

L'O.M.S préconise pour l'eau destinée à la consommation humaine un pH compris entre 6,5 et 8,5[41].

II – 2 – 3 – Conductivité

La conductivité traduit la minéralisation totale de l'eau. Sa valeur varie en fonction de la température, elle est donnée à 20°C [24].

Sa mesure permet de détecter immédiatement une variation de la composition de l'eau, par exemple :

- Baisse de conductivité de l'eau d'un réseau de chauffage due à l'entartrage.
- Réglage de la purge d'une chaudière ou d'un circuit de refroidissement pour limiter la concentration des sels dissous.
- Contrôle de la production d'une chaîne de déminéralisation.

La conductivité est généralement mesurée en micro-Simens par centimètre ($\mu\text{S}/\text{cm}$), approximativement la valeur en $\mu\text{S}/\text{cm}$ correspond à la salinité en mg/l.

On utilise également la résistivité, inverse de la conductivité, mesurée en Ohms.cm :

$$\text{Résistivité (Ohms.cm)} = 1\,000\,000 / \text{conductivité (en } \mu\text{S/cm)} \quad [24].$$

La réglementation propose une valeur guide, et non impérative de $400 \mu\text{S}/\text{cm}$ à 20°C et ses variations donnent des informations importantes sur l'évolution de la qualité de l'eau [23].

Tableau II – 1 : Relation entre minéralisation et conductivité [41].

Conductivité	Minéralisation
0 – 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$	Minéralisation très faible
100 – 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$	Minéralisation faible
200 – 333 $\mu\text{S}/\text{cm}$	Minéralisation moyenne accentuée
333 – 666 $\mu\text{S}/\text{cm}$	Minéralisation accentuée
666 – 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$	Minéralisation importante
> 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$	Minéralisation élevée

Une conductivité électrique de l'eau supérieure à $1500 \mu\text{S}/\text{cm}$ [41] fait considérer une eau comme inutilisable dans les zones irriguées [4].

II – 2 – 4 – Dureté

Le degré hydrotimétrique (TH) ou dureté totale ou titre hydrotimétrique, est un indicateur de la minéralisation de l'eau [24] ; il correspond à la somme des concentrations en cations métalliques à l'exception de ceux des métaux alcalins et de l'ion hydrogène.

Dans la plupart des cas la dureté est surtout due aux ions calcium et magnésium auxquels s'ajoutent quelquefois les ions fer, aluminium, manganèse, strontium [37].

La dureté se manifeste pratiquement par une difficulté dans la cuisson des légumes et dans la production de mousse avec le savon [35]. Elle s'exprime en milliéquivalents (mEq) de concentration en CaCO_3 ; elle est aussi très souvent donnée en degrés français ($^\circ\text{F}$).

- La dureté calcique (TCa) qui correspond à la teneur globale en sels de calcium;
- La dureté magnésienne (TM) qui correspond à la teneur globale en sels de magnésium.

- La dureté carbonatée (ou temporaire) correspond à la teneur en hydrogénocarbonate (HCO_3^{-2}) et carbonate de calcium et de magnésium ; elle correspond à la différence entre la dureté totale (TH) et la dureté permanente (P).
- La dureté permanente ou non carbonatée (P) correspond à la dureté qui persiste après ébullition de l'eau. Elle représente la teneur en sulfates et chlorures de calcium et de magnésium [37].

Les valeurs du degré hydrotimétrique de l'eau sont : [24]

- Valeur comprise entre 0 et 10°F = eau très douce.
- Valeur comprise entre 10 et 20°F = eau douce.
- Valeur comprise entre 20 et 30°F = eau moyennement dure.
- Valeur comprise entre 30 et 40°F = eau dure.
- Valeur supérieure à 40°F = eau très dure.

Il n'existe pas de limite supérieure du degré hydrotimétrique dans la législation française ni de valeur guide. Néanmoins le ministère de la santé qualifie d'idéal un degré hydrotimétrique compris entre 15°F et 25°F.

L'eau dure n'a pas d'effets nocifs sur la santé mais la formation du calcaire peut générer des désagréments matériels (entartrage des canalisations).

La limite inférieure du degré hydrotimétrique pour les eaux destinées à la consommation humaine et n'ayant pas subi à un traitement thermique est fixée à 15°F.

Une eau trop douce peut présenter des inconvénients pour la santé suite à la dissolution de métaux des canalisations tels que le fer ou le plomb, qui seront alors ingérés par notre organisme.

II – 2 – 5 – L'alcalinité

L'alcalinité d'une eau est définie par sa capacité à réagir avec les ions hydrogène (H^+), [35] elle correspond à la présence des hydrogénocarbonates (HCO_3^{-2}), carbonates (CO_3^{-2}) et hydroxydes (OH^-).

- Le titre alcalimétrique ou **TA** mesure la teneur de l'eau en alcalis libres et en carbonates alcalins caustiques.
- Le titre alcalimétrique complet ou **TAC** correspond à la teneur de l'eau en alcalis libres, carbonates et hydrogénocarbonates [37].

L'alcalinité se mesure à l'aide d'une solution étalon d'acide fort en présence d'indicateur coloré de pH.

Le TA et le TAC s'expriment généralement en degrés français (°F).

1 °F = 3.4 mg/l OH⁻ (hydroxyde).

1 °F = 6.0 mg/l CO₃²⁻ (carbonate).

1 °F = 12.2 mg/l HCO₃⁻ (bicarbonate) [24].

II – 2 – 6 – Matières en suspension (MES)

Les MES sont constituées de toutes les particules organiques ou minérales véhiculées par les eaux. Elles peuvent être composées de particules de sable, de terre et de sédiment arrachées par l'érosion, de divers débris apportés par les eaux usées ou les eaux pluviales très riches en MES, d'êtres vivants planctoniques (notamment les algues), etc. [42]. Elles correspondent à la concentration en éléments non dissous d'un échantillon [2].

Les directives du Conseil des Communautés Européennes imposent que l'eau destinée à la consommation humaine ne présente pas de MES. La réglementation française indique, dans le cas d'une eau présentant des MES, des contrôles complémentaires. De plus, en vue de satisfaire les exigences organoleptiques des consommateurs, ces eaux turbides subissent un traitement de coagulation-floculation-filtration [25].

II – 2 – 7 – Les matières minérales

II – 2 – 7 – 1 – Cations

- **Le sodium**

Le cation sodium (Na⁺) est très abondant sur la terre. On le retrouve dans les roches cristallines et les roches sédimentaires (sables, argiles, évaporites) [43].

Le sodium a un rôle dans l'irrigation, du fait de son action sur la perméabilité des sols [35].

Le niveau guide de la concentration du sodium dans l'eau destinée à la consommation humaine est fixé à : 150 mg/l [24].

- **Le potassium**

Le potassium, rarement présent dans l'eau à des teneurs supérieures à 20 mg/l. Il ne présente aucun inconvénient particulier bien que le potassium soit une des sources possibles de radioactivité dans l'eau [35].

Le niveau guide de la concentration du potassium dans l'eau destinée à la consommation humaine est fixé à : 12 mg/l.

- **Le fer**

La présence du fer dans l'eau est :

- Soit d'origine naturelle : le fer est abondant dans les roches sous forme de silicates, d'oxydes et d'hydroxydes, de carbonate et de sulfures.
- Soit due à la corrosion de canalisations de distribution en fonte ou en acier.

Il est soluble à l'état d'ion ferreux (Fe^{++}) et insoluble à l'état d'ion ferrique (Fe^{+++}). La présence de fer dans l'eau peut favoriser la prolifération de certaines souches de bactéries qui précipitent le fer ou corrodent les canalisations.

La présence de fer dans l'eau au-delà de 0.1 mg/l est gênante car elle va conférer à l'eau une couleur jaune à orangée, provoquer des dépôts d'hydroxyde ferrique, donner à l'eau un goût métallique désagréable.

La concentration guide dans les eaux destinées à la consommation humaine : 15 $\mu\text{g/l}$.

La concentration maximale admissible dans les eaux destinées à la consommation humaine : 200 $\mu\text{g/l}$ [24].

- **Le manganèse**

Le manganèse est associé au fer quoiqu'en quantité plus faible. C'est Mn^{+2} qui est soluble dans les eaux naturelles bien que le manganèse présente de nombreux autres états d'oxydation [35].

La présence de manganèse est gênante car elle peut donner à l'eau une couleur noirâtre, provoquer des dépôts d'hydroxyde, lui conférer un goût métallique désagréable [24].

La teneur en manganèse est limitée à 0.05 mg/l dans les eaux potables (la teneur souhaitable est inférieure ou égale à 0.01 mg/l) [35].

- **Les métaux lourds**

Les métaux lourds libérés dans l'environnement peuvent se déposer dans les cours d'eau et les contaminer. Suivant les concentrations rencontrées, le plomb, le mercure, le cadmium, l'arsenic, le cuivre, le zinc et le chrome peuvent être dangereux pour la santé. Ils s'accumulent dans l'organisme et leurs effets toxiques aigus et chroniques sont reconnus sur plusieurs organes. Certains d'entre eux sont toxiques pour le cerveau et les os [4].

II – 2 – 7 – 2 – Anions

- **Les chlorures**

Les chlorures sont présents en grande quantité dans l'eau de mer (± 19 g/l). Leur concentration dans l'eau de pluie est approximativement de 3 mg/l ; elles participent à la conductibilité électrique des cours d'eau.

La teneur en chlorures d'une eau dépend de l'origine de l'eau et de la nature du terrain qu'elle traverse.

Le niveau guide de la concentration en chlorures des eaux destinées à la consommation humaine : 25 mg/l.

La concentration maximale admissible des chlorures dans les eaux destinées à la consommation humaine : 200 mg/l.

Concentration est supérieure à 200 mg/l : eaux laxative et éventuellement dangereuses pour les patients atteints des maladies cardio-vasculaires ou rénales, pollution possible (rejet industriel ou rejet d'eaux usées) [24].

- **Les sulfates**

La concentration en ion sulfate des eaux naturelles est très variable. Dans les terrains ne contenant pas une proportion importante de sulfates minéraux, elle peut atteindre 30 à 50 mg/l, mais ce chiffre peut être très largement dépassé (jusqu'à 300 mg/l) dans les zones contenant du gypse ou lorsque le temps de contact avec la roche est élevé.

La teneur en sulfates des eaux doit être reliée aux éléments alcalins et alcalinoterreux de la minéralisation. Suivant ceux-ci, et selon l'intolérance des consommateurs, il est susceptible d'en résulter des troubles gastro-intestinaux, en particulier chez l'enfant.

Pour l'eau destinée à la consommation humaine, en raison de problèmes particuliers susceptibles d'introduire une gêne pour le consommateur (goût, corrosion), l'OMS recommande comme valeur limite 250 mg/l. Les directives du Conseil des communautés européennes indiquent un niveau guide de 25 mg/l et une concentration maximale admissible de 250 mg/l [37].

- **Les nitrates**

Par oxydation biologique, toutes les formes d'azote (azote organique, ammoniacque, nitrites) se transforment en nitrates. Dans les eaux naturelles non polluées, le taux des nitrates varie selon la saison et l'origine des eaux.

De par le développement de l'élevage, l'utilisation intensive d'engrais, les fientes et fumiers divers, voire les boues de station d'épuration, la teneur en nitrates des eaux souterraines et superficielles ne cessent de s'élever.

L'enrichissement des eaux superficielles en nitrates est lié également aux rejets des collectivités et occasionnellement de certaines industries (engrais, explosifs, oxydants).

Le lessivage causé par les pluies peut entraîner les nitrates vers la mer. Les eaux marines littorales sont alors confrontées à une prolifération algale qui peut être toxique pour l'homme directement et surtout indirectement par la consommation de coquillages.

Les nitrates associés au phosphore participent aux phénomènes d'eutrophisation (prolifération excessive du plancton et des macrophytes) préjudiciables aux traitements de potabilisation et à la sécurité des baignades (diminution de la transparence) [25].

Le seuil des nitrates est fixé plus ou moins à travers le monde à 50 mg de l'ion nitrate/l [24].

- **Les nitrites**

Les nitrites sont les sels de l'acide nitreux. L'acide nitreux est un acide instable de formule HNO_2 .

La formule de l'ion nitrite est NO_2^- . La contamination des eaux souterraines et superficielles par les nitrates est un problème rencontré de plus en plus fréquemment. Les nitrates se transforment en nitrites et éventuellement en nitrosamines au niveau du tube digestif.

La présence de nitrites dans le sang empêche l'hémoglobine de fixer convenablement l'oxygène et entraîne ainsi des risques de méthémoglobinémie aiguë. En outre, les nitrites sont très toxiques pour les poissons et souvent mortels. C'est la raison pour laquelle la teneur en nitrites dans l'eau potable est réglementée et, indirectement celle des nitrates en raison de leur capacité à se transformer en nitrites [2].

La concentration guide dans les eaux destinées à la consommation humaine est de 0.1 mg/l [24]. La pollution est considérée comme significative au-delà de 1 mg/l [25].

II – 3 – Paramètres organiques

II – 3 – 1 – La demande biologique en oxygène (DBO)

la DBO est la consommation en oxygène des micro-organismes présents dans le milieu en essai pour assimiler les substances organiques présentes dans ce même [44]. Elle est généralement mesurée en 5 jours [45] d'où le nom de DBO_5 .

La connaissance de cette valeur permet d'évaluer la charge polluante contenue dans l'eau. Elle s'exprime en milligrammes par litre d'oxygène [44].

Cette mesure est très utilisée pour le suivi de rejet de station d'épuration, car elle donne une approximation de la charge en matières organiques biodégradables [46].

II – 3 – 2 – La demande chimique en oxygène (DCO)

La DCO est la quantité d'oxygène nécessaire à la dégradation par voie chimique des matières organiques et minérales oxydables contenues dans l'eau. La demande chimique en oxygène détermine la quantité globale d'oxygène nécessaire à la dégradation de la pollution. Elle s'exprime en milligrammes par litre d'oxygène [44].

Généralement la DCO est 1.5 à 2 fois la DBO₅ pour les eaux usées urbaines et de 1 à 10 pour tout l'ensemble des eaux résiduaires industrielles. La relation empirique de la matière organique (MO) en fonction de la DBO₅ et la DCO est donnée par l'équation suivante :
$$MO = (2 DBO_5 + DCO)/3$$
 [20].

II – 3 – 3 – Carbone organique total (COT)

Le carbone organique total (COT) est habituellement utilisé afin d'étudier des pollutions ponctuelles ou l'influence anthropique au sein des aquifères [47], il représente la teneur en carbone lié à la matière organique, c'est la concentration en mg de carbone/l d'échantillon, et repose sur une mesure de CO₂ après oxydation complète. C'est une méthode directe pour mesurer la teneur en matières organiques d'une eau, il consiste à brûler l'échantillon d'eau à 950C° sous l'action de l'oxygène gazeux et de mesurer le CO₂ dégagé et mesurer le carbone total (organique et minéral). La détermination du COT passera par l'élimination du carbone minéral avant la mesure, ou par sa soustraction du carbone total [35].

II – 4 – Paramètres biologiques

L'eau contient naturellement des micro-organismes issus de l'activité biologique naturelle, dont certains sont pathogènes pour l'homme [48]. L'eau ne doit pas contenir de micro-organismes pathogènes (bactéries, parasites, virus), ni de germes témoins de contamination fécale [46]. Les maladies d'origine microbienne constituent le risque sanitaire le plus important dans le domaine des eaux d'alimentation : dans les situations exceptionnelles de fortes contaminations des eaux, la survenue d'épisodes épidémiques peut être observée. Les dernières épidémies observées sont liées à des pollutions accidentelles ou à des dysfonctionnements des dispositifs de traitement des eaux [48].

Les normes microbiologiques sont simplifiées. De fait, on ne trouve plus désormais que deux "limites de qualité", impératives, pour contrôler la conformité microbiologique de l'eau. Ces deux paramètres (Escherichia Coli et entérocoques) sont en fait des germes "précurseurs", dont la présence signale un risque de contamination microbiologique: virus et bactéries pathogènes ne peuvent se trouver dans l'eau en l'absence de ces deux

“précurseurs”. A contrario, il peut y avoir présence de ces germes “précurseurs” dans l'eau sans que pour autant ne s'y trouvent des virus ou bactéries pathogènes [49].

Le tableau II – 2 représente les principales infections humaines transmissibles par l'eau.

Tableau II – 2 : Les principales infections humaines transmissibles par l'eau [50].

	Micro-organismes responsables	Origine la plus fréquente
Sphère digestive		
Fièvres typhoïdes	<i>Salmonella typhi</i> (Para A – B)	Coquillages, Eau de boisson
Gastro-entérites	<i>E. coli</i> <i>Salmonella sp.</i> <i>Shigella sp.</i> <i>Yersinia</i> <i>Campylobacter</i> <i>Giardia</i> <i>Cryptosporidium</i> Rotavirus	Eau de boisson, aliments crus, Baignades
Choléra Hépatites A et E	<i>Vibrio cholerae</i> Virus	Eau de boisson, aliments souillés, coquillages
Sphère respiratoire – ORL		
Légionellose Mycoses pulmonaires	<i>Legionella sp.</i> <i>Aspergillus sp.</i> Actinomycètes, Thermophiles	Eaux aérosolisées, Compostage
Affections ORL	Adénovirus Réovirus	Piscine, baignades
Meningo-encéphalites	Amibiennes	Baignades (eau douce)
Sphère cutanéomuqueuse		
Dermatomycose	Dermatophytes	Piscines
Candidoses	<i>Candida albicans</i>	Baignades
Leptospiroses	Leptospires	Baignades (eau douce)
Suppurations bactériennes	Streptocoque hémolytique groupe A <i>Staphylococcus</i> <i>Pseudomonas</i>	Piscines Baignades
Dermatites	Furcocercaires	Baignades (eau douce)

Conclusion

La nature de l'eau à traiter, sa qualité ainsi que les principaux procédés de traitement que celle-ci doit subir sont connus grâce aux paramètres de qualité de cette eau. Le recours aux traitements des eaux, qui soumettent celle-ci à diverses étapes réalisées dans plusieurs stations spécialisées, a pour but de produire une eau potable ou moins polluée utilisée dans des divers domaines.

Chapitre III

Traitement des eaux par plantes macrophytes

Introduction

Les études et les travaux sur l'épuration des eaux dans les milieux plantés de macrophytes ont apparu au XXème siècle [51]. Les premières expériences ont été faites en Allemagne par Käte SEIDEL, Professeur biologiste [10].

Dès 1946, les travaux de Käte SEIDEL concernant les traitements des effluents industriels contenant des substances chimiques tels que les phénols, les chlorophénols et les métaux lourds ont apparu en mettant en évidence les potentialités épuratoires des plantes aquatiques et plus particulièrement le *Phragmite australis* (roseau). Depuis, cette nouvelle technologie extensive a été exploitée avec succès par plusieurs auteurs (FINLAYSON et CHICK, 1983 ; BIDDLESTONE et al. , 1991 ; BRIX, 1993...) pour le traitement de plusieurs types d'effluents (effluent de laiterie, d'abattoir, domestique, urbain...) [8].

D'autres travaux ont vu le jour au Maroc en 1998 par M. ABISSY et al. , portant sur les potentialités du roseau à épurer des eaux usées urbaines et en 2005 par S. Tiglyene et al. , concernant les tests de performances du *Phragmites australis* à épurer l'effluent du tannage avec des concentrations élevées en Chrome [13].

En 2007, la technique d'épuration a fait son apparition en Algérie par le ministère des ressources en eau en mettant en place un système expérimental d'épuration des eaux usées basés sur un procédé naturel. Ce pilote expérimental, destiné pour les petites agglomérations de moins de 2000 habitants, est le premier du genre en Algérie. Il a été réalisé dans la région Témacine pour servir de test pour une éventuelle vulgarisation à travers les zones dépourvus de système d'épuration et hameaux enclavés de notre pays, où des essais ont été réalisés pour comprendre le principe de fonctionnement du système d'épuration par lits plantés particulièrement en zone aride d'une part et la détermination des performances épuratoires et son impact environnemental d'autre part [10].

A Biskra en 2010, L. M. BENSMINA et al. , ont réalisé une étude permettant de mettre en évidence les potentialités du *Phragmite Australis* à traiter des eaux usées urbaines sous un climat semi aride, en évaluant leur pouvoir épuratoire [52].

Les stations utilisant ces plantes macrophytes ont été très efficaces dans l'élimination de la pollution carbonée avec des rendements jusqu'à 95% sur les principaux paramètres polluants (MES, DBO₅, DCO, l'azote et le phosphore) [12], les macrophytes aquatiques retiennent aussi 40 à 55 % des métaux par assimilation [13].

Ce procédé d'épuration rustique vise à un traitement intégral des eaux usées, sans apport d'énergie, et sans production de boues (les résidus sont minéralisés). Il exploite les capacités de filtration d'un substrat perméable planté de végétaux adaptés [53].

III – 1 – Types de plantes utilisées

Les principales espèces de plante utilisées dans le traitement des eaux usées sont présentées au tableau III – 1 et sont toutes des plantes de marais. On retrouve des plantes émergentes telles que la quenouille (*Typha sp.*), le roseau (*Phragmites australis*) et le jonc (*Juncus sp.*), les plantes flottantes telles que les lentilles d'eau (*Lemna minor*) ou lenticules (*Lemna sp.*), la jacinthe d'eau (*Eichornia crassipes*) et l'hydrocotyle d'Amérique (*Hydrocotyle umbellata*), ainsi que les plantes submergées telles que les myriophylles à épis (*Myriophyllum spicatum*), l'élodée du Canada (*Elodea canadensis*) et le potamot (*Potamogeton sp.*) (Figure III – 1).

Chacune des espèces peut croître dans des situations particulières et le choix des plantes doit être associé aux conditions d'exploitation des systèmes. En effet, par exemple, le *Phragmites australis* (roseau) qui est le plus communément utilisé est une plante qui croît naturellement en bordure des marais, dans les secteurs où il y a des périodes d'assèchement et d'inondation séquentielles et où le niveau moyen de la nappe est souvent près de la surface. C'est pourquoi ce type de plante se comporte très bien dans les systèmes de traitement à écoulement sous la surface ou près de la surface [9].



Figure III – 1 : Photos de quelques plantes macrophytes.

Tableau III – 1 : – Principales espèces des plantes utilisées [9].

Type de plantes	Nom vernaculaire	Nom scientifique	Principales caractéristiques du point de vue traitement des eaux usées	Remarques		
Plantes émergentes	Quenouille	<i>Typha sp.</i>	-Plante commune et rustique produisant une biomasse importante. -Reproduction rapide. -Conditions optimales de niveau d'eau entre 200 et 400 mm. -Système racinaire occupant l'horizon 0-300 mm dans le sol. -Résiste bien aux inondations prolongées.	-Moins de 10% du P peut être enlevé en procédant à une moisson régulière. -Moisson pour l'enlèvement des nutriments non retablis. Aspect économique de la moisson pour protection d'énergie et alimentation animale à étudier.		
	Roseau (phragmite australis)	<i>Phragmites communis</i>	-Plante commune et rustique produisant une biomasse importante (120 cm ³ /m ²). -Système racinaire occupant l'horizon 0-600 mm dans le sol.	-Efficacité moyenne de 50% mesurée pour l'enlèvement de P. -Moisson non recommandé car la plante affaiblie à long terme. -Croît bien lorsque la nappe phréatique est près de la surface.		
	Jonc		- <i>Scirpus americanus</i> - <i>Juncus marginatus</i> - <i>Juncus acuminatus</i>	-Plante commune et rustique. -Système racinaire occupant l'horizon 0-760 mm dans le sol. -Peut émerger sous 3 m d'eau.	-Voir remarque pour roseau.	
			<i>Schoenoplectus</i>			
			Iris	<i>Iris virginicus</i>		
				<i>Acorus</i>		
			<i>Carex</i>			
			<i>Sparganium</i>			
Plantes flottantes	Lentilles d'eau	<i>Lemna sp.</i> <i>Spirodela sp.</i> <i>Wolffia sp.</i>	-Reproduction très rapide en période végétative. -Pouvant croître à une température aussi basse que 5°C. Assure le contrôle de la croissance des algues par leur couverture. -Composition en P représente 0.6% du poids sec total.	-Enlèvement du P peut être important s'il y a récolte fréquente (hebdomadaire) durant la période végétative. -Sensible à la dérive du au vent. -Structure requise pour limiter la dérive. -Effluent provenant de bassin recouvert de lentilles d'eau souvent en condition anaérobie.		
	Jacinthes d'eau	<i>Echornia crassipes</i>	-Peuvent permettre un bon enlèvement du P si elles sont récoltées régulièrement.			
	Hydrocotyle d'Amérique	<i>Hydrocotyle sp.</i>	-Normalement une plante émergente avec racine ayant prise au sol, mais forme des structures flottantes lorsque les eaux sont riches en éléments nutritifs.	-Utilisé en combinaison avec les lentilles d'eau.		
Plantes submergées	Myriophylle à épis	<i>Myriophyllum heterophyllum</i>	-Oxygénation et support de nutriments sous l'eau.	-Plante submergée présente, sensibilité à toute limitation de passage de la lumière. (ex : par croissance des algues).		
	Éclodée du Canada	<i>Eclodea canadensis</i>	-Idem.			
	Potamot	<i>Potamogeton sp.</i>	-Idem.	-efficacité d'enlèvement de P de 25% et enlèvement de N de 70%.		

III – 2 – Le *Phragmites australis* (roseau)

III – 2 – 1 – Définition

Herbe géante [54], couramment appelé roseau commun ou *Phragmites australis*, était antérieurement aussi nommé Phragmite communis [55] ; c'est une espèce cosmopolite et très polymorphe [56], appartient à la famille des Poacées (Graminées), classé dans la tribu des Festucées [57] ; affectionne particulièrement les milieux humides non boisés, mais elle peut fort bien croître sur un sol sec.

Le roseau se propage essentiellement de manière végétative par le biais de rhizomes et de stolons et lorsqu'il s'installe dans un nouveau site, il peut donc, si les conditions lui sont favorables, envahir très rapidement une grande superficie et former des colonies particulièrement denses pouvant atteindre 325 tiges par mètre carré [58] avec une hauteur de 4 mètres [54]. Les terrains occupés par le phragmite sont appelés roselières.

La présence marquée du phragmite laisse croire qu'il est une plante opportune dans l'épuration des eaux usées ayant libre cours dans l'environnement [55].



Figure III – 2: *Phragmite australis* (roseau) [55].

III – 2 – 2 – Avantages

Le *Phragmite australis* (roseau) est la plante la plus couramment utilisée dans le domaine de l'épuration des eaux usées par filtres plantés de macrophytes à cause de sa possession de nombreux avantages :

- Parfaite adaptation aux conditions hydriques d'exploitation des filtres plantés ;
- Bon transfert de l'oxygène depuis les parties aériennes jusqu'aux rhizomes et aux racines, favorisant ainsi le développement des bactéries dans leur entourage ;
- Infiltration favorisée par le développement des tiges autour desquelles l'eau percole, et donc le risque de colmatage des filtres est réduit ;
- Facilité d'adaptation aux altitudes (sauf la haute montagne) et aux climats très divers ;
- protection contre le gel car la végétation tombe et couvre le filtre (isolation thermique);
- Pas d'entretien particulier ;
- Intégration paysagère [59].

III – 3 – Principe de l'épuration par macrophyte

Une zone humide est à elle seule une station d'épuration par action naturelle de dégradation et d'élimination des éléments organiques, ce processus d'auto épuration est dû en grande partie à des organismes vivants (bactérie, algues) qui minéralisent la matière organique pour ensuite être assimilée par les végétaux supérieurs appelés macrophytes.

Certains d'entre eux et principalement les *Phragmites australis* (roseaux) permettent une oxygénation du milieu et favorisent ainsi le développement de micro-organismes aérobie.

Les filtres plantés de roseaux fonctionnent comme une zone humide, ils constituent une alternative aux rejets et traitement des eaux usées et les effluents agricoles ou industriels. Ils peuvent aussi être un complément en affinage des traitements des eaux (abattement de l'azote et le phosphore) et des boues sortant d'une station d'épuration intensive [10].



Figure III – 3 : Filtre à écoulement verticale avant et après plantation de roseaux [1].

L'épuration est réalisée selon le principe de l'épuration biologique principalement aérobie dans des milieux granulaires des différentes dimensions. On ne procède pas au renouvellement régulier du massif filtrant ou à son lavage pour l'évacuation des boues produites au sein des filtres. En revanche, les boues produites en amont des filtres (sur les filtres ou dans un dispositif de décantation) doivent être évacuées.

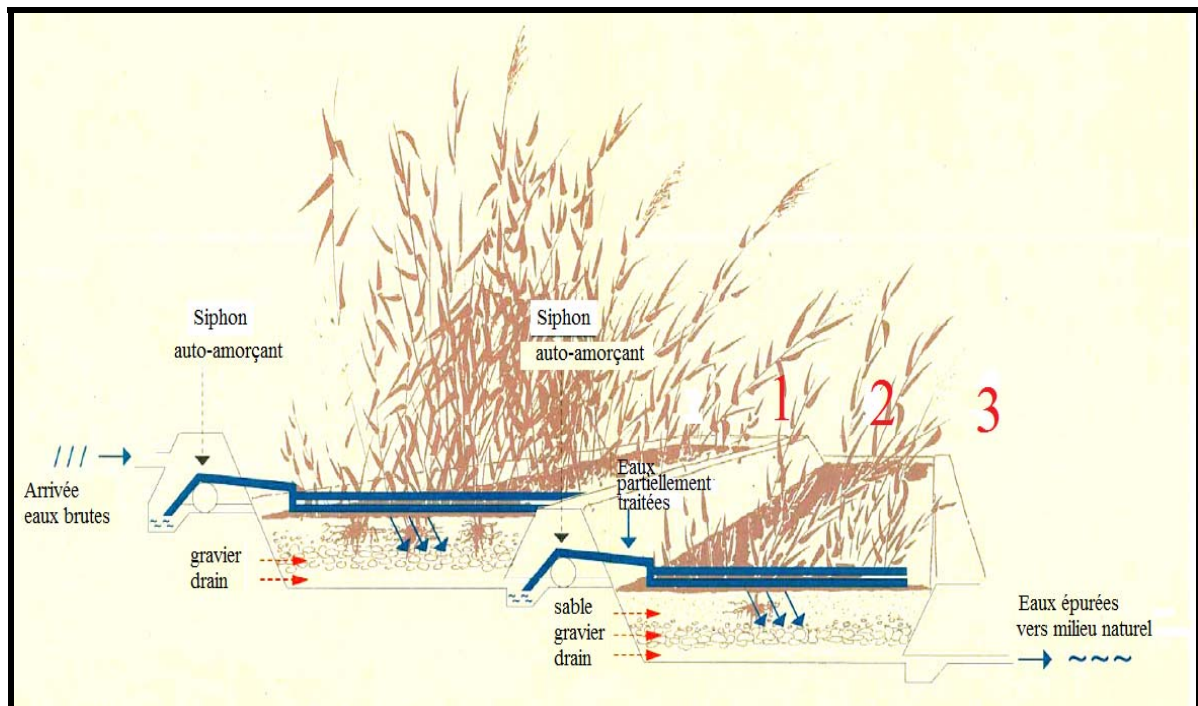


Figure III – 4 : Schéma du Pragmifiltre [1].

1 – Le traitement physique et biologique des eaux usées s’effectue dès le premier étage des filtres plantés de roseaux. Les effluents perdent par filtration jusqu’à 90% (contre seulement 50% par décantation classique) de leurs matières en suspension (MES) en traversant un massif de granulats adaptés. Les MES (boues) retenues sont déshydratées et compostées sur place grâce à l’action conjuguée des bactéries et des plantes. Dans ce processus leur volume diminue très fortement et le résidu est transformé en terreau qui s’accumule très lentement sur la surface des filtres.

Le traitement biologique de la matière organique dissoute commence également au niveau de cet étage.

2 – Au deuxième étage, le traitement de la matière organique dissoute se poursuit et les composés azotés réduits (toxiques pour les poissons) sont oxydés.

3 – Un troisième étage et/ou une recirculation des eaux permettent d’effectuer un traitement tertiaire de finition, afin d’obtenir un taux d’épuration supérieur aux normes requises habituellement [60].

On distingue deux types de filtres plantés, suivant le sens de l’écoulement :

- Les filtres à écoulement vertical
- Les filtres à écoulement horizontal [61].

III – 3 – 1 – Les filtres plantés à écoulement vertical

Les stations d’épuration à filtres plantés de roseaux à flux vertical sont souvent constituées au minimum de deux étages en série eux-mêmes constitués de deux ou trois filtres en parallèle fonctionnant en alternance deux fois par semaine. Les filtres du premier étage sont exclusivement constitués de différents types de graviers dans lesquels les phénomènes d’aération par diffusion sont sensiblement plus élevés que dans du sable. L’alternance de l’alimentation permet d’éviter le colmatage [61].

Les principaux mécanismes d’épuration s’appuient sur la combinaison de plusieurs processus en condition aérobie, qui se déroulent successivement sur les deux étages de traitement en série (fig. III – 5) [62].

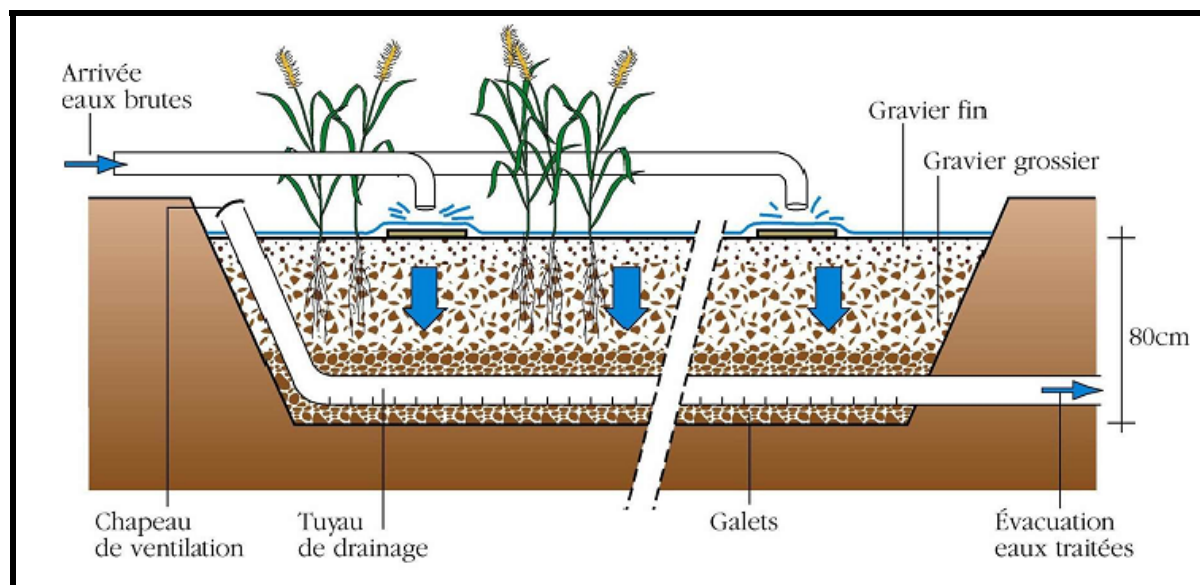


Figure III – 5 : Coupe transversale schématique d'un filtre à écoulement vertical.

- Les filtres à écoulement vertical sont alimentés en surface avec des eaux usées brutes, ayant subi un dégrillage grossier puis l'effluent percole verticalement à travers le massif filtrant. Cette première filtration permet la rétention physique des matières en suspension à la surface des filtres du 1^{er} étage, d'où une accumulation de boues théorique d'environ 15 mm par an, à capacité nominale [63].
- La dégradation biologique des matières dissoutes est réalisée par la biomasse bactérienne aérobie fixée sur le support non-saturé ainsi que sur la couche de dépôt accumulée en surface [1].

Le 1^{er} étage contribue essentiellement à la dégradation de la pollution carbonée avec un début de nitrification.

Le 2^{ème} étage permet d'affiner l'élimination de la fraction carbonée et complète la nitrification en fonction des conditions d'oxygénation, de température et de pH [63].

L'oxygénation, phénomène primordial dans ce système d'épuration est obtenue par une alimentation par bâchées, créant un phénomène de convection lors des déplacements de l'eau dans le massif filtrant ainsi que par diffusion gazeuse. Les drains mis en contact avec l'atmosphère assurent également un rôle important dans l'oxygénation des massifs filtrants par diffusion au niveau des racines [1]. Chaque bâchée doit se répartir uniformément sur l'ensemble de la surface du lit, pour un traitement optimum [61].

La nécessaire limitation, pour éviter le colmatage, du développement de la biomasse bactérienne dans les massifs filtrants est obtenue par auto-oxydation au cours des phases de repos. C'est pourquoi les dispositifs de filtration plantés verticaux sont constitués de plusieurs

files, en général trois au premier étage et deux au deuxième, en parallèle et alimentés en alternance [1].

Le rôle des roseaux est principalement mécanique ; les tiges de roseaux et les rhizomes (tiges souterraines) perforent la couche de boues superficielles. Ils créent alors des cheminements se prolongeant jusqu'au système racinaire et vers la couche drainante, cela permet l'oxygénation et évite le colmatage. Les roseaux permettent la couverture foliaire qui préserve la surface des filtres d'une éventuelle dessiccation estivale. Cela assure de l'ombre aux bactéries, leur permettant un bon développement.

L'évapotranspiration estivale conduit à une forte diminution du volume sortant. En hiver, la couverture des roseaux permet de limiter l'impact des faibles températures (gel).

Le rôle des roseaux pour l'élimination directe de la pollution (carbone, azote, phosphore) est extrêmement faible. Ce sont les micro-organismes, se développant dans le support filtrant, qui assurent l'épuration biologique [63].

III – 3 – 2 – Les filtres plantés à écoulement horizontal

Les filtres horizontaux sont des bassins remplis de manière homogène de sable, de gravier ou de sol en place, et dans lesquels ont été plantés des macrophytes [64].

Les filtres horizontaux ne sont pas alimentés par la surface, comme les filtres verticaux. Les eaux usées décantées entrent, via un gabion d'alimentation, directement dans le massif filtrant. Il est donc nécessaire de débarrasser l'effluent, au préalable, des matières en suspension, soit par l'intermédiaire d'un décanteur placé en amont, soit par un premier étage de filtration verticale [61].

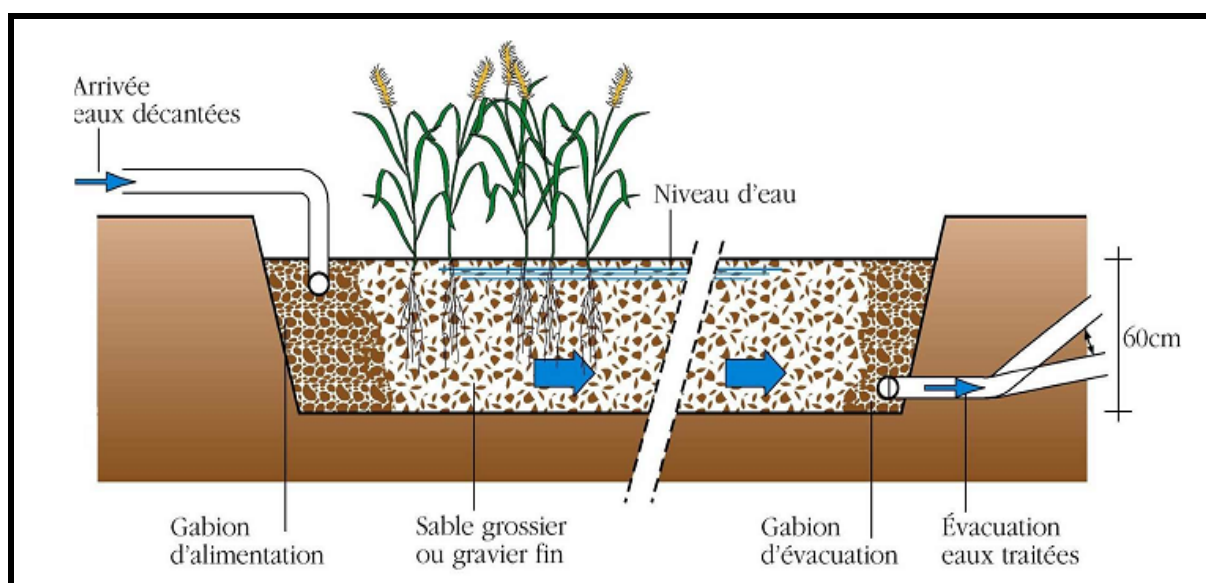


Figure III – 6 : Coupe transversale schématique d'un filtre à écoulement horizontal [62].

Les matières dissoutes sont dégradées dans le massif de filtration par les plantes et la biomasse bactérienne fixée sur le support.

Le niveau d'eau en sortie de filtre horizontal dépend de l'évolution de la perméabilité du massif filtrant au cours du temps et de la variation des charges hydrauliques. Il est ajustable par un système de rehausse sur toute la hauteur du filtre

L'aération résulte uniquement des apports provenant des racines des plantes et de la diffusion gazeuse dans la partie superficielle [1]. L'apport d'oxygène est faible par rapport à la demande totale. La pénurie en oxygène, limite la dégradation de la pollution carbonée et azotée, oxydation du carbone organique et de l'ammonium, et par voie de conséquence limite la croissance bactérienne hétérotrophe et autotrophe [61].

III – 4 – Les systèmes hybrides

Les systèmes hybrides sont en fait l'association en série de filtres verticaux et de filtres horizontaux.

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

Des variantes ont aussi été étudiées plus récemment, où l'on trouve des filtres horizontaux en premier étage suivis de filtres verticaux, les premiers filtres ont pour rôle la rétention des matières en suspension et l'élimination des matières organiques dissoutes, les seconds mieux oxygénés assurent la nitrification. Une recirculation des effluents nitrifiés en tête de traitement peut permettre d'obtenir de bons résultats en matière de dénitrification, mais ce dispositif nécessite d'installer des pompes et organes de programmation dont la complexité serait en contradiction par rapport à la rusticité des filtres plantés de macrophytes qui est leur principal intérêt [64].

III – 5 – Principales caractéristiques de l'épuration par lits plantés

Les résultats épuratoires montrent généralement une très bonne transformation des matières organiques en minéraux (plus de 80 %) et une dégradation excellente des matières en

suspension (plus de 90 %). La transformation des composés azotés est moyenne (40 %) et l'élimination des germes pathogènes est d'un niveau moyen. Ces résultats épuratoires dépendent de plusieurs paramètres, parmi lesquels on peut citer :

- **L'aération du substrat** : Qui représente 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** : Elle influence l'épuration. 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. Une faible température abaisse fortement l'activité de certains micro-organismes.
- **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. Actuellement, dans les lits où l'écoulement se faisait en percolation, on utilise un sol à granulométrie croissante du haut vers le bas. 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. C'est un point majeur de ce type de traitement par rapport à celui de l'infiltration-percolation sur sable [61].

III – 6 – La plantation des macrophytes

Les macrophytes peuvent être plantés en toutes saisons sauf en période de gel ou de grande chaleur. Une densité minimale de 4 plants/m² doit être respectée. On peut aussi mettre en place des rhizomes (2 nœuds) seuls à raison de 5 par m².

On peut pour le premier étage des filtres verticaux, adapter la surface plantée au taux de raccordement de la station et au volume journalier d'alimentation. En effet les eaux usées ne couvriront pas l'ensemble de la surface des filtres dès leur mise en service notamment en cas de sous charge initiale. Les roseaux plantés au bord des filtres se développent donc mal. La plantation sur la seule zone humidifiée suffit. Les autres zones seront envahies par les

rhizomes au fur et à mesure que les débits d'eau usée augmentent et que les surfaces humidifiées s'étendent.

Sur le deuxième étage, grâce à la capillarité du sable, les conditions de développement des roseaux sont dès la mise en service favorables sur l'ensemble de la surface des filtres.

Pour les filtres horizontaux, il peut être intéressant de laisser une lame d'eau de quelques centimètres au-dessus de la surface, pendant le début de la croissance des plants (3 à 4 mois), pour éviter le développement de mauvaises herbes [62].

III – 7 – L'évacuation des boues

Les boues du premier étage des filtres verticaux sont à évacuer à une fréquence décennale au plus. Leur siccité est de l'ordre de 20 à 30% et la teneur en matières volatiles se situera à un niveau de 35% (au fond, dépôts les plus anciens) à 60% en surface.

L'évacuation peut se faire à l'aide d'une pelleteuse ou d'un tracto-pelle équipé d'un godet assez large et tranchant (du type de ceux utilisées au curage des faussés), pour éviter de déstabiliser le massif filtrant en arrachant le système racinaire des roseaux.

La reprise des roseaux est assez rapide à partir des rhizomes restés en place dans la couche de matériau de filtration (en une dizaine de semaine de printemps, il est difficile de voir la différence avec un filtre non curé) [62].

Conclusion

Ce type de traitement se base sur l'utilisation des plantes macrophytes tel que le *Phragmites australis* (roseau), il révèle la simplicité et l'efficacité des procédés naturels par rapport à la complexité d'une station d'épuration classique qui fractionne les opérations de traitement de l'eau.

Sur le plan environnemental, l'avantage, qui est certainement le plus avancé, est l'absence d'odeur pour des effluents qui en génèrent beaucoup lors de leur stockage d'une part et d'autre part, le système a un intérêt particulier pour son insertion dans le paysage.

Chapitre IV

Conception du dispositif expérimental

Introduction

Ce chapitre est réservé à la description des différentes étapes nécessaires à la conception du dispositif expérimental, à la façon de le réaliser et à présentation de l'idée général de la méthode de traitement.

IV – 1 – Présentation générale filtres plantés de *Phragmites australis* (roseau)

IV – 1 – 1 – Principe de la technique

Cette technique repose sur le principe de l'épuration biologique principalement aérobie en milieux granulaires fins à grossiers [63], où les eaux usées passent, [11] sans traitement préalable, [66] à travers des bacs étanches disposés en série et remplis de graviers et de sable dans lesquels sont plantés de jeunes tiges de *Phragmites australis* (roseaux) [11].

Les micro-organismes aérobies se développent à la périphérie des grains de sable et des graviers et constituent le corps des massifs filtrants [67] et engendrent la dégradation et la minéralisation de la matière organique, qui devient dès lors assimilables par les plantes [68].

Le développement important des tiges et des racines des végétaux crée un réseau dense dont le rôle est d'éviter le colmatage en perçant les matières qui se déposent sur la plage d'infiltration et en contribuant à leur minéralisation [67].

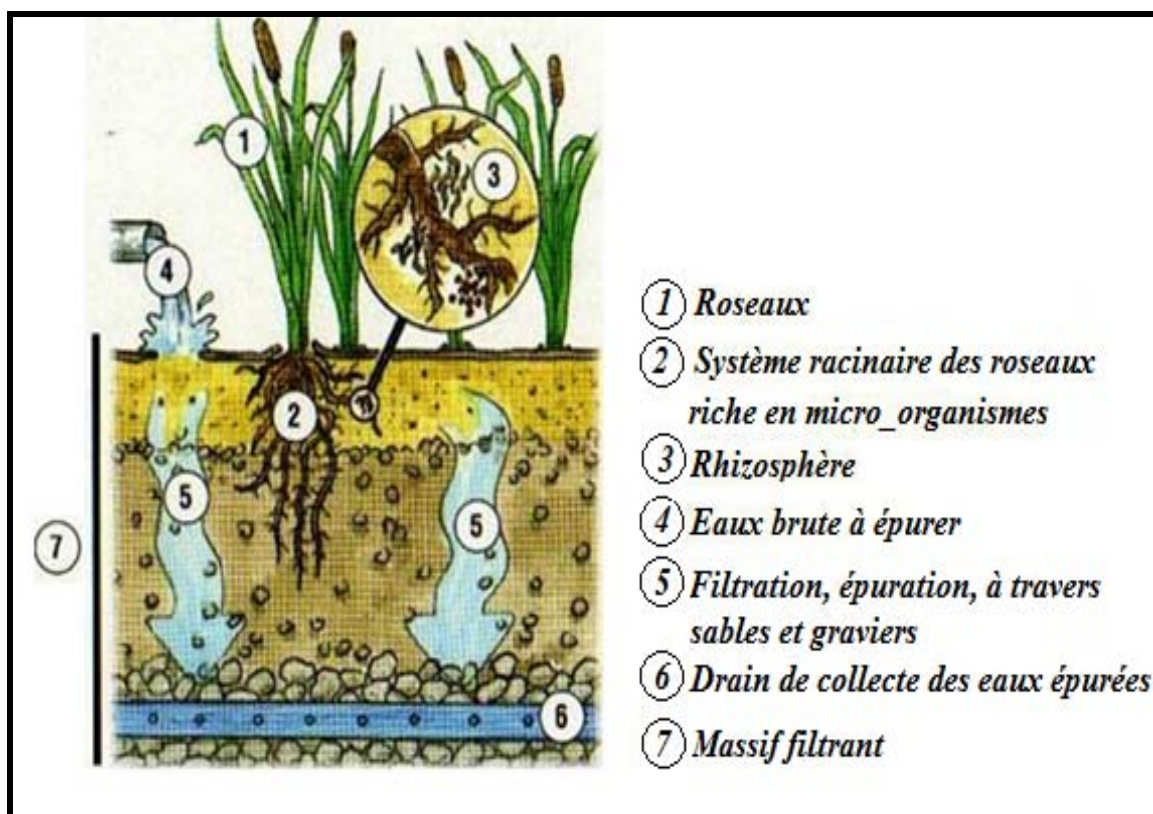


Figure IV – 1 : Filtration par les *Phragmites australis* (roseaux) [68].

IV – 1 – 2 – Caractéristiques générales

- Filières de traitement biologique à cultures fixées sur support fin.
- Fonctionnement simple → Personnel non qualifié.
- Coût d'investissement et fonctionnement faible (peu de consommable).
- Gestion des boues simple (Fréquence curage 10/15 ans).
- Compatible réseau séparatif et unitaire [69].

IV – 2 – Critères de choix du *Phragmites australis* (roseau)

Les roseaux ont un système racinaire très développé. Ces racines, spécialisées dans l'absorption de l'eau et de sels minéraux contenus dans le sol, accumulent des réserves et permettent à la plante de se fixer au substrat.

Au cours des processus d'absorption, les racines libèrent des glucides, des enzymes et d'autres nutriments, utilisables par les micro-organismes. L'intense réseau racinaire favorise donc la fixation des bactéries épuratrices sur les rhizomes. Elles abritent donc une flore bactérienne importante, qui se nourrit des effluents et dégrade la matière organiques.

Toute une population de bactéries, champignons et autres micro-organismes se concentre ainsi autour de la racine : on estime que les bactéries, dans cette zone privilégiée, sont 20 à 10000 fois plus nombreuses que dans un sol nu. Ces micro-organismes vont favoriser la minéralisation de l'azote et du phosphore, qui seront alors disponibles pour la plante. Ainsi crée une étroite coopération entre plantes et micro-organismes.

Cette partie du sol où des organismes vivants sont associés est appelée la rhizosphère. L'activité microbienne au niveau de cette rhizosphère dépend de différents facteurs comme la teneur en eau et en oxygène. Les bactéries fixées au niveau de cette rhizosphère sont aérobies, elles ont besoin de d'oxygène pour dégrader la matière organique.

Outre leur implication, via leur système racinaire, dans la dégradation de la matière organique, les roseaux ont une action mécanique : avec le vent, ils cassent la croûte qui se forme à leurs pieds, ce qui permet de limiter les phénomènes de colmatage et de garantir la perméabilité du filtre en surface, cette protection est possible grâce au mode de croissance très rapide des racines, la rhizosphère génère un système décolmatant grâce aux racines tubulaires (rhizomes traçants) et aux nouvelles pousses à travers le massif filtrant et les boues accumulées.

L'intense réseau racinaire favorise la fixation des bactéries épuratrices sur les rhizomes.

Enfin le roseau offre également une protection contre les faibles températures et protègent les bactéries contre l'action des rayons ultraviolets du soleil, qui sinon les tueraient [68].

IV – 3 – Technique de l'épuration

IV – 3 – 1 – Description du dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est constitué de trois bacs identiques en plastique de forme cylindrique d'une capacité de 100 litres. Les dimensions sont les suivantes : $H = 80$ cm et $d = 40$ cm.

Chaque bac est doté d'un robinet de vidange en sa partie inférieure précédé d'un tissu permettant le passage de l'eau à travers les orifices très fins du tissu afin d'éviter le bourrage par le sol.

La partie supérieure du bac est la plus ouverte afin de renfermer le plus grand nombre de tiges de la plante utilisée dans l'expérience.

Chaque bac comprend deux couches superposées de milieux granulaires. La couche de bas est constituée de gravier d'une hauteur de 10 cm sur laquelle est posée la seconde qui est constituée de sable pris dans un oued et qui est d'une hauteur de 40 cm.

De jeunes tiges de *Phragmites australis* (roseaux) sont plantées dans le sol d'une densité maximale pour une optimisation dans l'opération épuration.

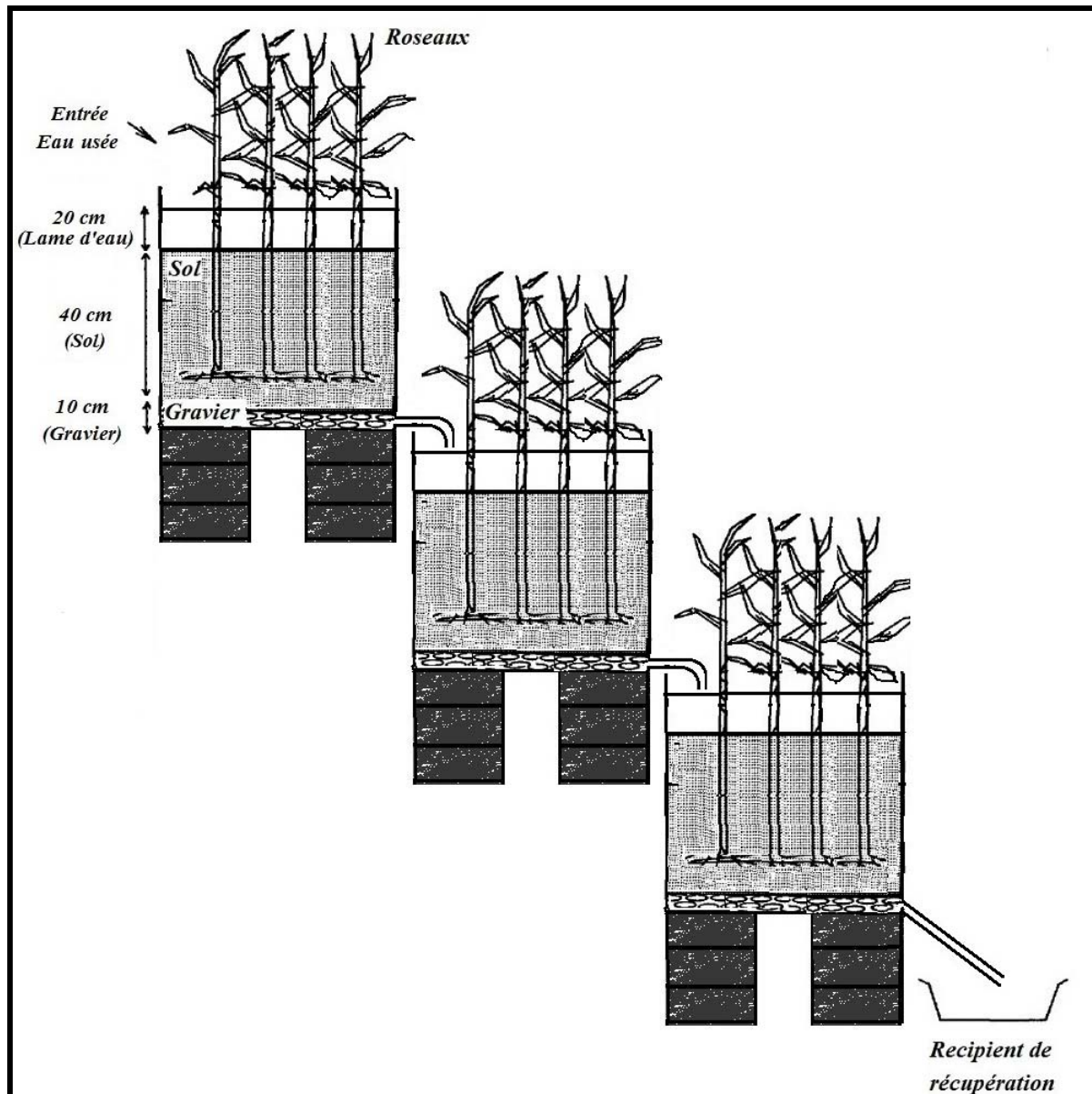


Figure IV – 2 : Schéma du dispositif expérimental.

IV – 3 – 2 – Rôles des différentes composantes du dispositif

IV – 3 – 2 – 1 – Le gravier

Le gravier est utilisé pour éviter l'entassement du sol au fond des bacs laquelle peut produire des conditions d'asphyxie des racines par excès d'eau, perturber le développement et le fonctionnement physiologique normal des plantes [13], Le gravier sert comme support pour le développement des micro-organismes aérobies [67] et facilite aussi le drainage en cas de vidange.



Figure IV – 3 : Couche de gravier.

IV – 3 – 2 – 2 – Le sol

Le sol utilisé est pris dans la bordure de l'oued où le végétal utilisé dans l'expérience a été pris. Il jouit d'une texture limono-argilo-sableuse [argile : 6.98% ; limon fin : 6.98% ; limon grossier : 3,66% ; sable fin : 7,63% ; sable grossier : 74,75%].

C'est un sol basique qui est riche en matières organiques ; sa conductivité électrique est élevée, le choix s'est porté sur ce sol sachant qu'il a une capacité de rétention de l'eau et des matières dissoutes dans ses espaces intercellulaires, il s'agit d'un sol basique biologiquement actif qui favoriserait la prolifération d'une flore bactérienne assurant la décomposition, l'humification et la minéralisation des matières organiques [70].

Ce genre de sol favorise une meilleure adhésion sol-eau usée et un bon fonctionnement du système [13]. A la périphérie des grains du sol se développent les micro-organismes aérobies [67] et par conséquent il a le rôle de support pour ces derniers et aussi l'enlèvement des nutriments et de certains métaux par adsorption [9].

De par sa granulométrie, le sol a un rôle évident de filtration des matières en suspension présentes dans les eaux usées. Son efficacité dans ce rôle dépend en grande partie de la texture du matériau que l'on approche par sa granulométrie et qui interviendra notamment sur les caractéristiques hydrodynamiques (conductivité hydraulique en milieu saturé ou non) [64].



Figure IV – 4 : couche de sol.

IV – 3 – 2 – 3 – Les macrophytes

La plante macrophyte utilisée dans la conception du dispositif expérimentale est le *Phragmites australis* (roseau) qui est une herbe géante qui affectionne particulièrement les milieux humides non boisés et qui peut fort bien aussi croître sur un sol sec [58].



Figure IV – 5 : *Phragmites australis* (roseau) utilisé.

Les jeunes tiges ont été prélevées dans un milieu naturel en l'occurrence le bord d'un oued où le sol a été pris. Ce végétal est planté dans les bacs décrits plus haut dans l'état de jeunes tiges où ils ont eu le temps de pousser.

a – Rôles des tissus aériens

- La couverture foliaire préserve la surface des filtres de la dessiccation en été. Elle procure également un ombrage qui permet aux bactéries de se développer, contribuant ainsi à la minéralisation de la matière organique [62] retenue à la surface qui se transforme en terreau gardant une bonne perméabilité de la surface des filtres [71].
- L'évapotranspiration estivale conduit à une forte diminution de volume sortant [62]. En hiver, l'ombrage des végétaux permet aussi d'atténuer les variations de température et un taux d'hygrométrie propice au développement bactérien atténue l'impact négatif des faibles températures sous des climats froids [72].
- Les feuilles permettent de réduire la vitesse du vent [71].
- Création d'une atmosphère favorisant le développement des micro-organismes [69].
- Percement de la couche de dépôts superficiels par les effets du vent autour de la tige du *Phragmites australis* (roseau) et facilitation de l'écoulement du média filtrant [72].



Figure IV – 6: Photographie d'une tige de *Phragmites australis* (roseau) implanté [69].

- Aptitude de transmettre l'oxygène des feuilles à travers la tige dans la rhizosphère qui stimule la dégradation de la matière organique et la croissance des bactéries nitrifiantes [52].
- Intérêt esthétique et paysager.

b – Rôles des racines et rhizomes

- La croissance des racines et des rhizomes permet un maintien ou une régulation de la conductivité hydraulique initiale. La faible granulométrie du substrat (sable ou gravier) ainsi que l'apport important de matière organique sont propices au colmatage du filtre. La croissance des parties racinaires limite ces risques en formant des pores tubulaires le long des racines qui se développent [62].
- Etant très dense, le système racinaire représente un bon réseau de drainage [71].
- Les vides dus à la mort des racines contribuent à l'augmentation de la perméabilité des filtres [71].
- L'oxygène provenant des feuilles aux racines permet le développement d'une vie biologique intense dans le sol et favorise l'oxydation des substances réductrices présentes dans l'environnement anoxique d'où une limitation des zones anaérobies, qui ne sont que des zones de fermentations, par conséquent une absence des mauvaises odeurs [71].
- La sécrétion d'acide organique, de composés carbonés et d'antibiotiques favorise et stimule l'activité bactérienne [71].
- Les racines et les rhizomes assurent une grande surface de contact sol-eau usée [66] (fig. III – 7), dont le développement racinaires accroît la surface de fixation pour le développement des micro-organismes et pour des réactions de précipitation [62] ; ces racines produisent des exsudats toxiques pour les bactéries pathogènes [52].



Figure IV – 7 : Racines et rhizomes du *Phragmites australis* (roseau) [52].

- Le métabolisme des plantes, c'est-à-dire l'assimilation des nutriments, contribue également à l'épuration des eaux, mais est fonction des plantes utilisées et de la surface mis en œuvre [1].

IV – 3 – 2 – 4 – Les micro-organismes

Particulièrement proliférant en milieu humide, les micro-organismes se nourrissent des matières dont sont chargées les eaux usées et les transforment en molécules inoffensives [73].

Le principal rôle des micro-organismes est, comme dans tout procédé de traitement biologique, la dégradation de la matière organique. Ce sont eux qui assurent les différents processus d'oxydation et de réduction. Ils génèrent grâce à la dégradation de la matière organique l'énergie nécessaire à la biosynthèse. Ils minéralisent les composés azotés et phosphorés, et les rendent ainsi assimilables par les plantes. Ils assurent également les réactions de nitrification/dénitrification.

Ils ont besoin d'un support de fixation pour se développer et ne pas être entraînés par les eaux usées ; celui-ci est assuré par les plantes (surtout leurs organes souterrains) et le matériau.

La dégradation de la matière organique par les micro-organismes est productrice de biomasse bactérienne qui doit être à son tour dégradée pour éviter le colmatage [64].

IV – 4 – Etapes de réalisation de l'expérience

Le *Phragmites australis* (roseau) qui sert à l'expérience a été planté sous forme de jeunes tiges dans les trois bacs destinés à l'expérience et a été irrigué par une eau propre. Après croissance, et par souci de mettre le végétal en conditions contrôlées et adéquates à l'expérience, le milieu (sol) doit subir une opération de lessivage par les eaux usées objet de l'expérience répétée trois fois.

L'étape suivante est de mettre le sol en saturation pour assurer une lame d'eau d'une épaisseur entre 20 et 30 cm. Afin de mettre le végétal dans une situation similaire à celle qu'il avait dans la nature.

La saturation des bacs est effectuée en calculant le volume des pores de sol qui représente le volume d'eau usée nécessaire.

Pour effectuer un essai, on suit les étapes suivantes :

➤ **1^{ère} étape**

- Faire une analyse de l'eau usée servant à l'expérience qui porte sur la Demande chimique en oxygène (DCO), les matières en suspension (MES), et le métal en question.

➤ **2^{ème} étape**

- Verser l'eau usée dans les trois bacs jusqu'à saturation, puis créer une lame d'eau de hauteur variant entre 20 et 30 cm dans le 1^{er} bac et déterminer un temps défini.
- Après expiration du temps dans le 1^{er} bac, l'eau est transférée dans le deuxième pour y rester le même temps et pareillement pour le troisième bac. Le temps de séjour est le temps où l'eau est restée dans le 1^{er}, le 2^{ème} et le 3^{ème} bac.

➤ **3^{ème} étape**

- Faire une analyse de l'eau sortante du troisième bac portant sur la DCO, les MES et le métal en question.
 - Le même traitement est répété pour un temps de séjours variant en croissance.

Conclusion

La conception de filtres plantés de macrophytes possède réellement de nombreux avantages ; c'est une technologie fiable, simple d'exploitation, efficace, adaptable au lieu, facilitant grandement la gestion des boues d'épuration et capable d'assimiler les métaux lourds. Elle offre aussi une solution économique demandant peu d'entretien et s'inscrit dans une démarche de développement durable.

Chapitre V

Résultats et discussions

Introduction

Cette partie consiste à valider le dispositif expérimental de plantes macrophytes conçu afin de réaliser l'expérience pour le traitement des eaux usées et faire un constat de l'efficacité de ce dispositif.

V – 1 – Réalisation de l'expérience

V – 1 – 1 – Analyses du sol

Dans le but d'identifier les caractéristiques physico-chimiques du support, les échantillons du sol ont été pris directement dans les bacs utilisés dans le dispositif avant le commencement de l'expérience.

V – 1 – 1 – 1 – Détermination du volume des pores de sol

Le calcul du volume des pores du sol est effectué selon la relation suivante :

$$x = \frac{p \times V}{100}$$

Où :

x : Le volume des pores en cm^3 ;

p : La porosité du sol en % ;

V : Le volume du sol cm^3 [74].

a – Détermination de la porosité (p)

La porosité est calculée selon la relation suivante :

$$p = \left(1 - \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}} \right) \times 100$$

Où:

ρ_{app} : La densité apparente ou le poids volumique en g/cm^3 ;

ρ_{abs} : La densité absolue ou le poids spécifique en g/cm^3 [74].

a – 1 – Détermination de la densité apparente (ρ_{app})**◆ Mode opératoire****1. Matériel**

- Une colonne graduée de diamètre compris entre 4 et 4,5 cm et d'une hauteur comprise entre 30 et 40 cm ;
- Un récipient utilisé comme contenant de la colonne ;
- Une balance ;
- Un four [74].

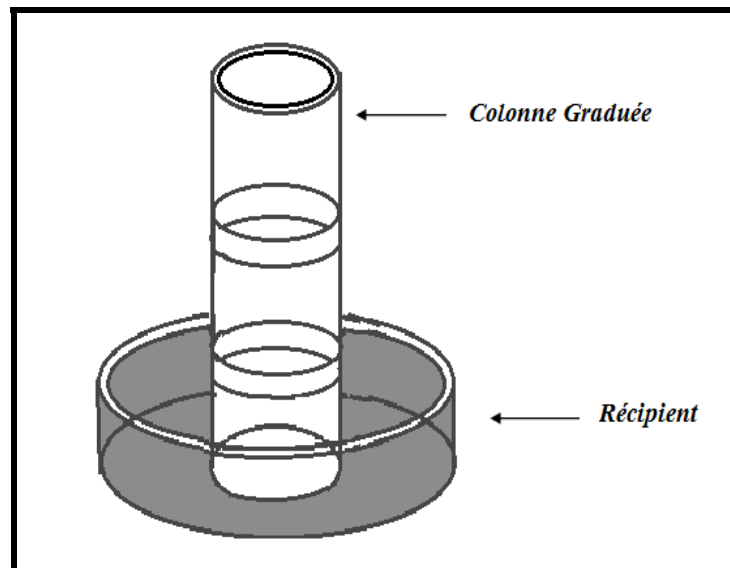


Figure V - 1 : Schéma de détermination de la densité apparente (ρ_{app}) [74].

2. Procédures

- Peser la colonne avant le remplissage par le sol ;
- Remplir la colonne par le sol jusqu'à une hauteur de 5 cm et tasser, ensuite compléter à une hauteur entre 25 ou 35 cm et laisser un vide en haut d'une hauteur de 5 cm. Un entassement est fait à chaque fois qu'en remplis à une hauteur de 5 cm ;
- Peser la colonne après le remplissage ;
- Déterminer la densité apparente (ρ_{app}) [74].

◆ *Calcul* (ρ_{app})

$$\rho_{app} = \frac{A}{V_1}$$

Les facteurs A et V_1 sont calculés comme suit :

$$\begin{cases} A = \frac{100 \times A_1}{100 + r} \\ V_1 = \pi \frac{d^2}{4} \times h \end{cases}$$

Où:

A : Le poids du sol sec dans la colonne (g) ;

V_1 : Le volume du sol dans la colonne (cm)³ ;

A_1 : Le poids de la colonne avec sol (g) – le poids de la colonne vide (g) ;

r : L'humidité du sol en % poids sec ;

h : La hauteur du sol dans la colonne (cm) ;

d : Le diamètre de la colonne (cm) [74].

➤ **Calcul de A_1**

$A_1 = \text{le poids de la colonne avec sol (g)} - \text{le poids de la colonne vide (g)}$

$$\begin{cases} \text{Le poids de la colonne avec sol} = 484,6 \text{ g} \\ \text{Le poids de la colonne vide} = 134,02 \text{ g.} \end{cases}$$

$$A_1 = 484,6 - 134,02 = 350,58 \text{ g}$$

➤ **Détermination de l'humidité (r)**

La détermination de l'humidité se fait selon la relation suivante :

$$r = \frac{\text{poids du sol humide} - \text{poids du sol sec}}{\text{poids du sol sec}} \times 100$$

◆ *Mode opératoire*

1. Matériel

- Creusé ;
- Une balance ;
- Un four (105°C) [75].

2. Procédures

- Peser le creusé ;
- Peser une quantité de sol dans le creusé ;
- Mettez au four à 105°C pendant 36 heures ;
- Peser ;
- Obtenir la masse de sol sec par soustraction :

$$(Masse\ creusé + sol\ sec) - masse\ creusé = masse\ sol\ sec$$
- Calcul le % d'humidité du sol [75].

◆ *Calcul (r)*

$$r = \frac{\text{poids du sol humide} - \text{poids du sol sec}}{\text{poids du sol sec}} \times 100$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Le poids du sol humide} = 34,6 \text{ g} \\ \text{Le poids du sol sec} = 28,97 \text{ g} \end{array} \right.$$

L'humidité (r) est égale alors à :

$$r = \frac{34,6 - 28,97}{28,7} \times 100 = 19,43 \% \text{ poids sec}$$

Le poids du sol sec dans la colonne (A) est égal donc à :

$$A = \frac{100 \times A_1}{100 + r} = \frac{100 \times 350,58}{100 + 19,43} = 293,54 \text{ g}$$

➤ **Calcul du volume du sol (V_1)**

$$V_1 = \pi \frac{d_1^2}{4} \times h_1$$

Où:

d_1 : C'est le diamètre de la colonne ($d_1 = 4 \text{ cm}$) ;

h_1 : C'est la hauteur du sol dans la colonne ($h_1 = 25 \text{ cm}$).

$$V_1 = \pi \frac{4^2}{4} \times 25 = 314 \text{ cm}^3$$

La densité apparente est égale donc à :

$$\rho_{app} = \frac{A}{V_1} = \frac{293,54}{314} = 0,9348 \text{ g / cm}^3$$

a – 2 – Détermination de la densité absolue (ρ_{abs})

◆ **Mode opératoire**

1. Matériel

- Mortier ;
- Broyeur électrique ;
- Une balance ;
- Un four ;
- Un tamis de 200 μm ;
- Pycnomètres [76].

2. Procédures

- Prendre 15 à 20 g du matériau à étudier (le sol), séché et on le fragmente dans un mortier puis dans un broyeur électrique ;
- Faire passer les poudres à travers un tamis de 200 μm ;
- Nettoyer et sécher puis peser les pycnomètres secs avec leurs capillaires, utiliser deux pycnomètres pour les essais parallèles ;
- Prendre 5 à 6 g du matériau à étudié et les verser dans le pycnomètre ;

Déterminer la masse du matériau avec précision en faisant la différence entre la masse du pycnomètre contenant le matériau et sa masse initiale ;

- Remplir les pycnomètres à moitié avec de l'eau distillée et faire bouillir l'ensemble pendant 20 à 30 minutes afin d'éliminer l'air ;
- Ajouter une quantité d'eau distillée supplémentaire et nécessaire après l'ébullition pour combler le pycnomètre ;
- Après refroidissement à température ambiante, réduire le niveau d'eau du pycnomètre jusqu'au trait du repère avec une balance analytique 0,0001 de précision ;
- Vider les pycnomètres, les laver soigneusement, les remplir d'eau distillée et les peser [76].

◆ Calcul (ρ_{abs})

$$\rho_{abs} = \frac{m}{v}$$

Où :

m : Le poids du sol sec en g ;

v : Le volume du sol sans les pores en cm^3 ;

Les facteurs m et v sont calculés comme suit :

$$\begin{cases} m = m_2 - m_1 \\ v = \frac{(m_2 - m_1) - (m_3 - m_4)}{\rho_{liq}} \end{cases}$$

Avec :

m_1 : Masse du pycnomètre vide avec son bouchon à capillaire = 40,41 g ;

m_2 : Masse du pycnomètre + poudre de matière (sol) + bouchon = 46,41g ;

m_3 : Masse du pycnomètre et son bouchon + matière + eau = 93,79 g ;

m_4 : Masse du pycnomètre + eau = 90,27 g.

$$\rho_{liq} = \rho_{eau} = 1 \text{ g/cm}^3$$

La densité absolue est égale donc à :

$$\rho_{abs} = \frac{m}{v} = \frac{(46,41 - 40,41) \times 1}{(46,41 - 40,41) - (93,79 - 90,27)} \Rightarrow \rho_{abs} = 2,42 \text{ g/cm}^3$$

La valeur de la porosité est donc :

$$p = \left(1 - \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}} \right) \times 100 = \left(1 - \frac{0,9348}{2,42} \right) \times 100$$

$$p = 61,37\%$$

b – Détermination du volume du sol (V)

$$V = \pi \frac{d^2}{4} \times h$$

Où :

d : C'est le diamètre du bac utilisé pour l'expérience, $d = 40$ cm ;

h : C'est la hauteur du sol dans le bac utilisé pour l'expérience, $h = 40$ cm.

$$V = \pi \frac{20^2}{4} \times 40 \Rightarrow V = 50240 \text{ cm}^3$$

Le volume des pores (x) est égale alors à :

$$x = \frac{p \times V}{100} = \frac{61,37 \times 50240}{100} = 30832,288 \text{ cm}^3$$

$$x = 30,83 \text{ l}$$

Les caractéristiques physico-chimiques du sol utilisé sont regroupées dans le tableau V – 1.

Tableau V – 1 : Caractéristiques physico-chimiques du sol utilisé.

Paramètre	Teneur
Humidité (r)	19,43 %
Densité apparente (ρ_{app})	0,9348 g/cm ³
Densité absolue (ρ_{abs})	2,42 g/cm ³
Porosité (P)	61,37%

V – 1 – 1 – 2 – Détermination du volume de la saturation du sol

La couche du gravier doit être prise en considération laquelle représente environ 10% du volume des pores.

Donc le volume d'eau usée nécessaire pour la saturation (V_{sat}) égale à $x+10\%x$.

$$V_{sat} = x + 10\%x$$

$$V_{sat} = 33,913 \text{ l}$$

Il faut donc **33,913 litres** pour la saturation de chaque bac.

V – 1 – 2 – Analyses de l'eau avant et après traitement

L'eau usée, utilisée dans l'expérience, est prise dans un oued situé à la proximité d'une zone industrielle et elle est l'objet d'une analyse avant d'entamer l'expérience (entrée). Après avoir resté dans les bacs des temps de séjour de 3, 6, 9, 12 et 15 jours, elle est soumise, à nouveau, à une nouvelle analyse (sortie).

Les échantillons à analyser (à l'entrée et à la sortie du dispositif) sont gardés dans des récipients rincés plusieurs fois avec l'eau à analyser puis fermés hermétiquement sans laisser de bulles d'air.

Les récipients peuvent être en verre ou en plastique. Les bouteilles type d'eau minérale sont bien adaptées [77].

Les échantillons prélevés ont fait l'objet d'une mesure des matières en suspension (MES), demande chimique en oxygène (DCO) et le fer (Fe).

V – 1 – 2 – 1 – Analyse des matières en suspension (MES)

1. Signification

La mesure des MES permet d'apprécier la charge solide en suspension d'une eau naturelle ou résiduaire [78].

2. Principe

La détermination des matières en suspension (MES) consiste à séparer les phases solide et liquide par filtration sur filtre de porosité 0,45 μm . Le filtre est pesé après séchages à 105 °C [70].

3. Matériels

- Dispositif de filtration (trompe à eau, fiole et entonnoir de filtration) ;
- Filtres (porosité : 0,45 μm) ;
- Etuve à 105°C ;
- Balance [78].

4. Mode opératoire

- Laver le filtre à l'eau distillée, le sécher à l'étuve (1 heure à 105°C ou 15 minutes au micro-onde à puissance moyenne) et le placer en attente dans un dessiccateur ;
- Peser le filtre ; M_0 (mg) ;
- Placer le filtre dans l'appareil de filtration et mettre en route le système d'aspiration ;
- Verser progressivement le volume (V) d'eau à analyser sur le filtre jusqu'à ce que l'appareil de filtration se vide ;
- Rincer le récipient qui a contenu l'échantillon avec 10 ml d'eau distillée et filtrer les eaux de lavage ;
- Mettre le filtre à sécher (1 heure à 105°C ou 15 minute au micro-onde à puissance moyenne). Laisser refroidir le filtre au dessiccateur ;
- Peser le filtre ; M_1 (mg) [78].

5. Expression des résultats

La teneur de l'eau en matières en suspension (mg/l) est donnée par l'expression :

$$MES = \frac{M_1 - M_0}{V} \times 100 \text{ [mg / l]}$$

Où :

V : volume d'eau utilisée (ml) ;

M_0 : masse du filtre avant utilisation (mg) ;

M_1 : masse du filtre après utilisation (mg) [37].

Le rendement épuratoire d'abattement en MES est calculé comme suit :

$$\text{Rendement (\%)} = \frac{X_i - X_f}{X_i} \times 100$$

X_i = Teneur en MES dans l'eau usée appliquée sur le lit (concentration initiale) ;

X_f = Teneur en MES le filtrat (concentration finale).

Les résultats d'analyses des matières en suspension (MES) pour des temps de séjour de 3, 6, 9, 12 et 15 jours à l'entrée et la sortie du système sont représentés sur le tableau V – 2.

Tableau V – 2 : Analyses des matières en suspension (MES).

Temps de séjour (jours)	Température de l'air (°C)		Température de l'eau (°C)		MES (mg/l)		Rendement (%)
	Entrée	Sortie	Entrée	Sortie	Entrée	Sortie	
3	17	15	15	16	70	30	57,14
6	14	9	12	12	85	50	41,17
9	12	3	10	4	225	195	13,33
12	14	19	11	20	220	10	95,45
15	17	14	15	15	85	15	82,35

V – 1 – 2 – 2 – Analyse de la demande chimique en oxygène (DCO)

1. Signification

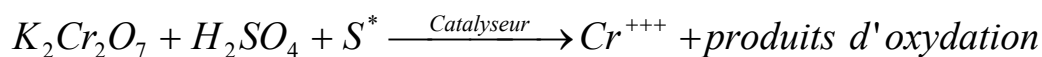
La DCO permet d'apprécier la concentration en matières organiques ou minérales, dissoutes ou en suspension dans l'eau, au travers de la quantité d'oxygène nécessaire à leur oxydation chimique totale [79].

2. Principe

Dans des conditions opératoires bien définies, certaines matières contenues dans l'eau sont oxydées par un excès de dichromate de potassium en milieu acide et en présence de sulfate d'argent et de mercure, l'excès de dichromate de potassium est dosé par le sulfate de fer et d'ammonium. Un indicateur approprié permet de détecter la fin du dosage.

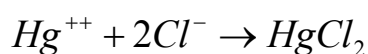
Les réactions peuvent être schématisées comme suit : [79]

❖ *Oxydation des substances (s*) présentes dans l'eau*

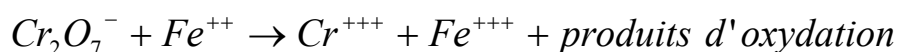


❖ *Intervention d'un agent masquant*

Pour éviter l'oxydation des ions chlorures en chlore, on utilise le sulfate de mercure (II) qui complexe les ions Cl⁻ : [79]



❖ *Réaction de dosage*



3. Produits et matériels

❖ Produits

- Sulfate de mercure cristallisé ;
- Acide sulfurique ($d = 1,84$) ;
- Solution d'acide sulfurique à 4 mol/l ;
- Solution du sulfate d'argent ;
- Solution de sulfate de fer et d'ammonium (sel de Mohr) à 0,12 mol/l ;
- Solution de dichromate de potassium 0,04 mol/l ;
- Solution de Féroïen [79].

❖ Matériels

- Dispositif à reflux ;
- Ballons de 250 ml ;
- Pipette ;
- Burette ;
- Eprouvette ;
- Bloc chauffant [79].



Figure V – 2 : Expérience de la détermination de la demande chimique en oxygène (DCO).

4. Mode opératoire

Il est nécessaire, avant d'effectuer la détermination de la DCO proprement dite, de vérifier le titre de la solution ferreuse et de procéder à un essai à blanc.

➤ *Vérification de la concentration de la solution de sulfate de fer et d'ammonium*

Dans un bécher, mettre 5 ml de solution étalon de dichromate de potassium à 0,04 mol/l. Compléter à environ 100 ml avec la solution d'acide sulfurique (4 mol/l), laisser refroidir. Ajouter quelques gouttes de solution de ferroïne et titrer avec la solution sulfate de fer et d'ammonium en déterminant la quantité nécessaire de pour obtenir le virage rouge violacé [37].

$$C_{(mol/l)} = \frac{V_{dichromate} \times 0,04}{V_{sulfate\ de\ fer}} \times 6$$

➤ **Protocole**

Introduire 50 ml d'eau à analyser soigneusement homogénéisée dans un ballon de 500 ml contenant quelques billes pour régulariser l'ébullition.

Ajouter 1 g de sulfate de mercure cristallisé ($HgSO_4$) et 5 ml de solution sulfurique de sulfate d'argent (Ag_2SO_4).

Ajouter 25 ml de solution de dichromate de potassium 0,04 mol/ l puis avec précaution 70 ml de solution sulfurique de sulfate d'argent en agitant par un mouvement circulaire du ballon et en refroidissant sous un courant d'eau froide. Porter à ébullition pendant deux heures sous réfrigérant à reflux adapté au ballon.

Laisser refroidir, diluer à 350 ml avec de l'eau distillée. Ajouter quelques gouttes de solution de féroïen.

Déterminer la quantité nécessaire de solution de sulfate de fer et d'ammonium pour obtenir le virage au rouge violacé.

Procéder à la même opération sur 50 ml d'eau distillée (essai à blanc) [37].

5. Expression de résultats

La demande chimique en oxygène (DCO) exprimée en milligrammes d'oxygène par litre est égale à :

$$DCO_{(mg\ O_2/l)} = \frac{8000 \times (V_0 - V_1) \times T}{V}$$

Avec :

V_0 : Volume de sulfate de fer et d'ammonium nécessaire au dosage (ml) ;

V_1 : Volume de sulfate de fer et d'ammonium nécessaire à l'essai à blanc (ml) ;

T : Titre de la solution de sulfate de fer et d'ammonium ;

V : Volume de la prise d'essai [37].

Le rendement épuratoire d'abattement en DCO est calculé comme suit :

$$Rendement (\%) = \frac{X_i - X_f}{X_i} \times 100$$

X_i = Concentration de la DCO dans l'eau usée appliquée sur le lit (concentration initiale) ;

X_f = Concentration de la DCO le filtrat (concentration finale).

Les résultats d'analyses de la demande chimique en oxygène (DCO) pour des temps de séjour de 3, 6, 9, 12 et 15 jours à l'entrée et la sortie du système sont représentés sur le tableau V – 3.

Tableau V – 3 : Analyses de la demande chimique en oxygène (DCO).

Temps de séjour (jours)	Température de l'air (°C)		Température de l'eau (°C)		DCO (mg O ₂ /l)		Rendement (%)
	Entrée	Sortie	Entrée	Sortie	Entrée	Sortie	
3	17	15	15	16	80	40	50
6	14	9	12	12	120	80	33,33
9	12	3	10	4	88	30	65,91
12	14	19	11	20	20	8	60
15	17	14	15	15	110	10	90,90

V – 1 – 2 – 3 – Analyse du fer (Fe)

La détermination de la teneur en fer (Fe) est estimée moyennant un appareil I.C.P. (*Inductively Coupled Plasma*) (Annexe I).



Figure V – 3 : Spectrométrie d'émission avec plasma à couplage inductif (ICP).

Le rendement épuratoire d'abattement de Fe est calculé comme suit :

$$\text{Rendement (\%)} = \frac{X_i - X_f}{X_i} \times 100$$

X_i = Concentration du Fe dans l'eau usée appliquée sur le lit (concentration initiale) ;

X_f = Concentration du Fe dans le filtrat (concentration finale).

Les résultats d'analyses de fer (Fe) pour des temps de séjour de 3, 6, 9 et 12 jours à l'entrée et la sortie du système sont représentés sur le tableau V – 4.

Tableau V – 4 : Analyses du fer (Fe).

Temps de séjour (jours)	Température de l'air (°C)		Température de l'eau (°C)		Fe (µg/l)		Rendement (%)
	Entrée	Sortie	Entrée	Sortie	Entrée	Sortie	
3	17	15	15	16	2,995	1,552	48,18
6	14	9	12	12	2,690	0,236	91,11
9	12	3	10	4	2,923	9,497	-
12	14	19	11	20	4,502	2,760	38,69

V – 2 – Interprétation des résultats

V – 2 – 1 – Matières en suspension (MES)

L'évolution temporelle de la concentration des MES dans l'eau usée d'alimentation (entrée) et le filtrat de lit planté de *Phragmites australis* (sortie) est présentée à la figure V – 4. On remarque que la concentration des matières en suspension (MES) de l'eau usée d'alimentation varie dans le temps entre 70 et 255 mg/l.

Pour le filtrat de lit, les concentrations des MES sont nettement inférieures à celles de l'eau usée d'alimentation. En dehors des temps de séjour de 6 et de 9 jours où les concentrations les plus forte des MES ont été révélées, les concentrations des MES de filtrat oscillent en moyenne autour de 18 mg/l.

Les résultats des rendements épuratoires des MES en fonction du temps de séjour sont représentés sur la figure V – 5, dont le maximum d'abattement en MES atteint 95,45% lorsque le temps de séjour est de 12 jours et pour des températures moyennes de l'air et de l'eau de 16,5°C et 15,5°C respectivement.

La diminution de la concentration des MES dans le filtrat serait due à la filtration physique qui retient les matières grossières en surface et les plus fines à l'inférieure des pores

par interception et fixation sur les grains ou par interactions chimiques de type Van Der Waals.

Les concentrations élevées des MES dans les filtrats pour un temps de séjour évalués à 6 et à 9 jours pourraient être liées au lessivage d'argile résiduelle provenant du sable de filtration [80].

La qualité des eaux du filtrat du lit plantée de *Phragmites australis* est conforme aux normes internationales de la qualité des eaux douces superficielles utilisées ou destinées à être utilisées pour la production d'eau destinée à la consommation humaine (25 mg/l) [23] pour un temps de séjour ≥ 12 jours.

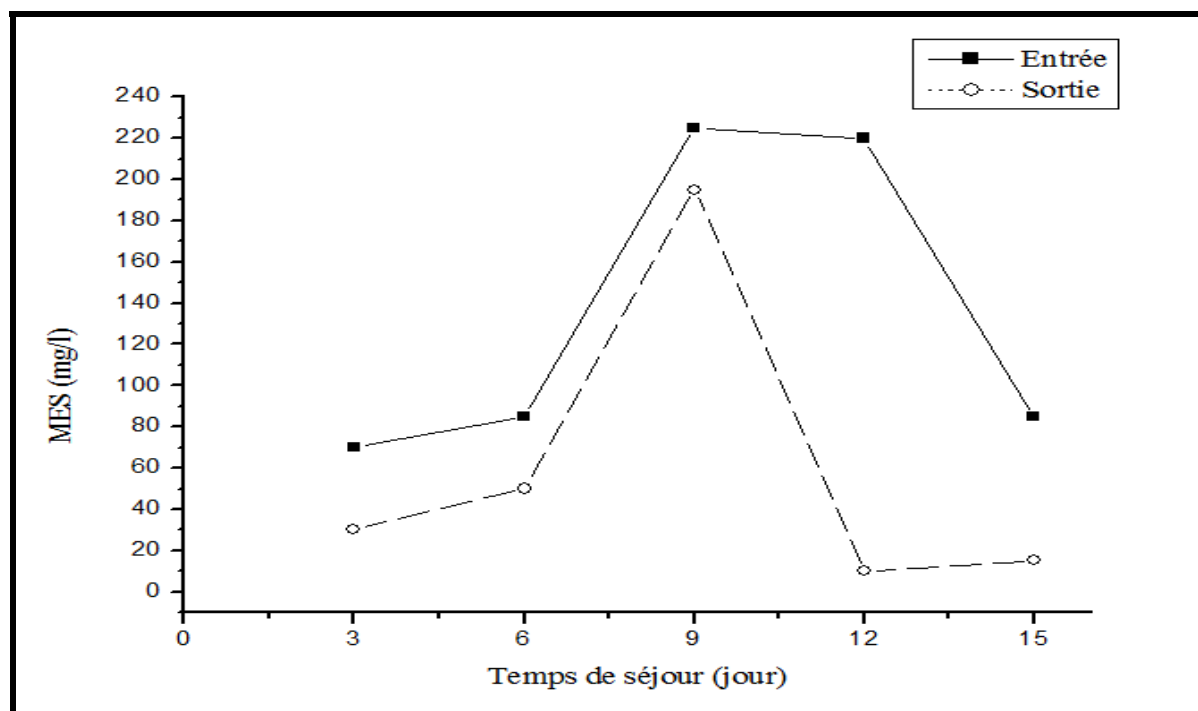


Figure V – 4 : Evolution temporelle des MES.

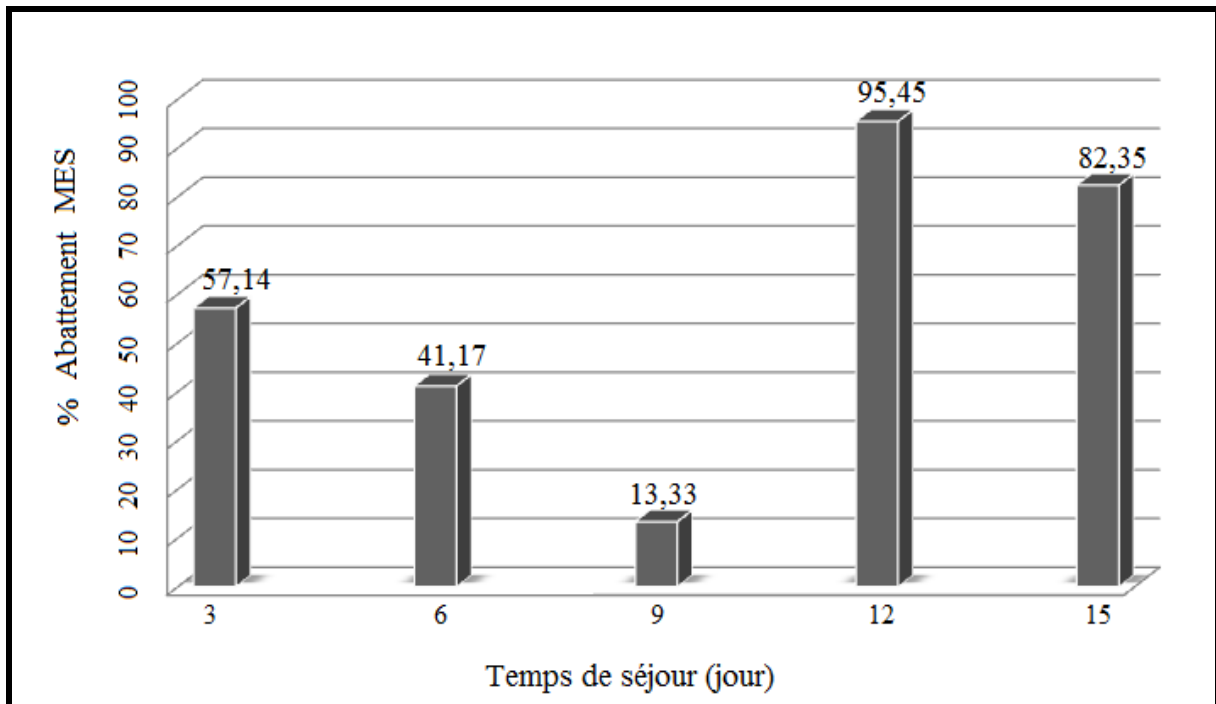


Figure V – 5 : Pourcentage d’abattement en MES.

V – 2 – 2 – Demande chimique en oxygène (DCO)

L’évolution temporelle de la concentration de la demande chimique en oxygène (DCO) dans l’eau usée d’alimentation (entrée) et le filtrat de lit planté de *Phragmites australis* (sortie) est présentée à la figure V – 6. On remarque que la concentration de la demande chimique en oxygène (DCO) diminue dans le filtrat (sortie) par rapport à l’eau usée d’alimentation (entrée). Elle varie entre 20 et 120 mg O₂/l dans l’eau usée d’alimentation.

Dans les filtrats et en dehors des temps de séjour de 3 et de 6 jours où les concentrations les plus fortes de la DCO ont été observées, les taux de la DCO de filtrat oscillent en moyenne autour de 13 mg O₂/l.

Les résultats des rendements épuratoires de la DCO en fonction du temps de séjour sont représentés sur la figure : V – 7, dont le maximum d’abattement en DCO atteint 90,90% lorsque le temps de séjour est de 15 jours et pour des températures moyennes de l’air et de l’eau de 15,5°C et 15°C respectivement.

Le lit planté donne des filtrats dont la concentration de la DCO est inférieure à celle de l’eau usée d’alimentation. Ceci est dû à la rétention physique de la matière organique de l’eau usée dans les filtres et l’oxydation de celle-ci par la flore microbienne.

Le lit planté de *Phragmites australis* a donné un meilleur rendement épuratoire (90,90%). Ce résultat est probablement lié à la présence des plantes qui créent des conditions physico-chimiques favorables à l’oxydation de la DCO par la flore microbienne. Celles-ci

apportent de l'oxygène dans le massif filtrant via les racines et les rhizomes. Par ailleurs, les plantes favorisent le développement de la biomasse microbienne au sein même des dépôts organiques en surface grâce à l'ombrage qu'elles procurent et à l'hygrométrie qu'elles maintiennent [80].

Les concentrations élevées de la DCO dans les filtrats pour des temps de séjour évalués à 3 et à 6 jours pourraient être liées à l'importante concentration en DCO de l'eau usée d'alimentation dans ces périodes et le temps de séjour qui est assez court ce qui a empêché l'obtention d'un meilleur rendement.

La qualité des eaux du filtrat du lit plantée de *Phragmites australis* est conforme aux normes internationales de la qualité des eaux douces superficielles utilisées ou destinées à être utilisées pour la production d'eau destinée à la consommation humaine (30 mg O₂/l) [23] pour un temps de séjour ≥ 9 jours.

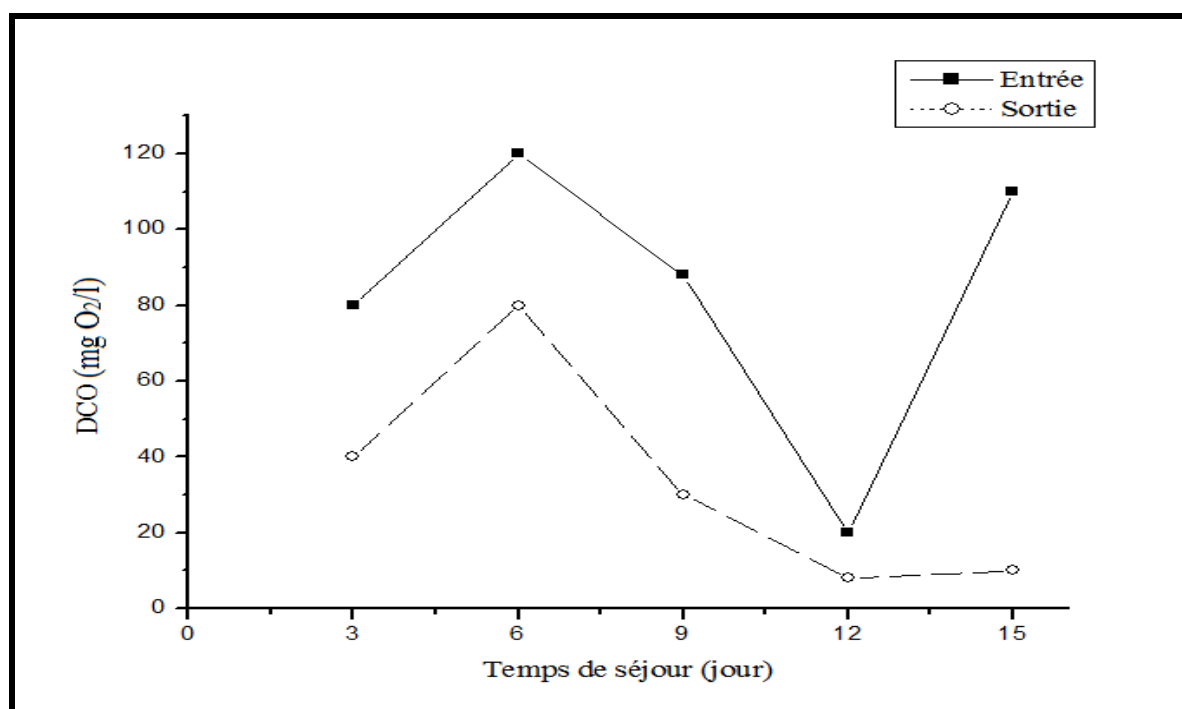


Figure V – 6 : Evolution temporelle de la DCO.

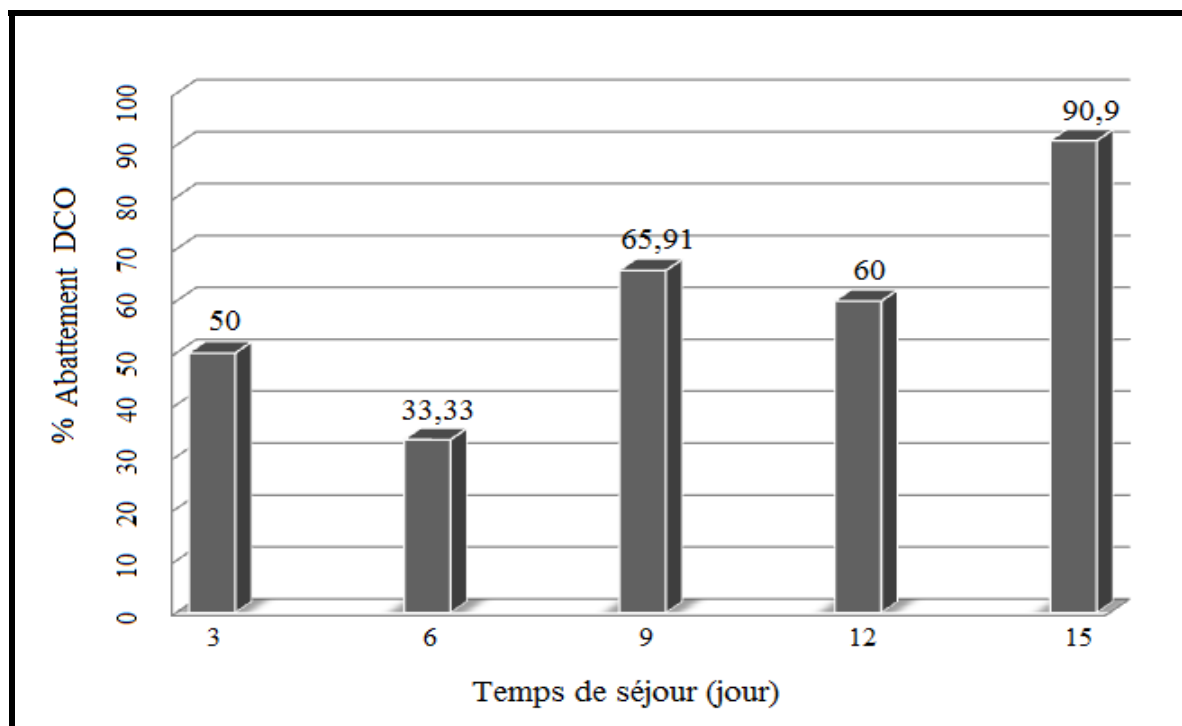


Figure V – 7 : Pourcentage d’abattement en DCO.

V – 2 – 3 – Le fer (Fe)

L’évolution temporelle de la concentration en fer (Fe) dans l’eau usée d’alimentation (entrée) et le filtrat de lit planté de *Phragmites australis* (sortie) est présentée à la figure V – 8. On remarque que la concentration en Fe de l’eau usée d’alimentation varie dans le temps entre 2,690 et 4,502 $\mu\text{g/l}$.

Pour le filtrat de lit, les concentrations en Fe varient et elles sont inférieures à celles de l’eau usée d’alimentation sauf pour un temps de séjour égale à 9 jours où la concentration du filtrat est supérieure à celle d’eau usée d’alimentation. En dehors de ce temps de séjour (9 jours), les concentrations en Fe de filtrat varient en moyenne autour de 1,516 $\mu\text{g/l}$.

Le rendement épuratoire d’abattement en Fe atteint un maximum (91,22%) lorsque le temps de séjour est de 6 jours et pour des températures moyennes de l’air et de l’eau de 11,5°C et 12°C respectivement.

La diminution du taux de fer, en général, est due à sa rétention dans le système à *Phragmites australis* par immobilisation au niveau du substrat via des mécanismes tels que l’adsorption au niveau des sites d’échange, fixation à la matière organique, incorporation dans la structure du sol et par précipitation sous forme de composés insolubles [13] et aussi par le passage du fer assimilable dans le végétal.

Le taux de fer est élevé dans le filtrat pour un temps de séjour de 9 jours peut être expliqué par un fort cumul de cet élément dans le substrat (sol) par les mécanismes d'adsorption au niveau des sites d'échange. En effet les teneurs en éléments métalliques des sols et des sédiments sont liées à la taille des particules et aux concentrations en argile et en matière organique contenues dans ces matériaux. Les argiles et les matières organiques sont en principe capables de piéger et de concentrer les métaux lourds par des mécanismes d'adsorption et de complexation [13].

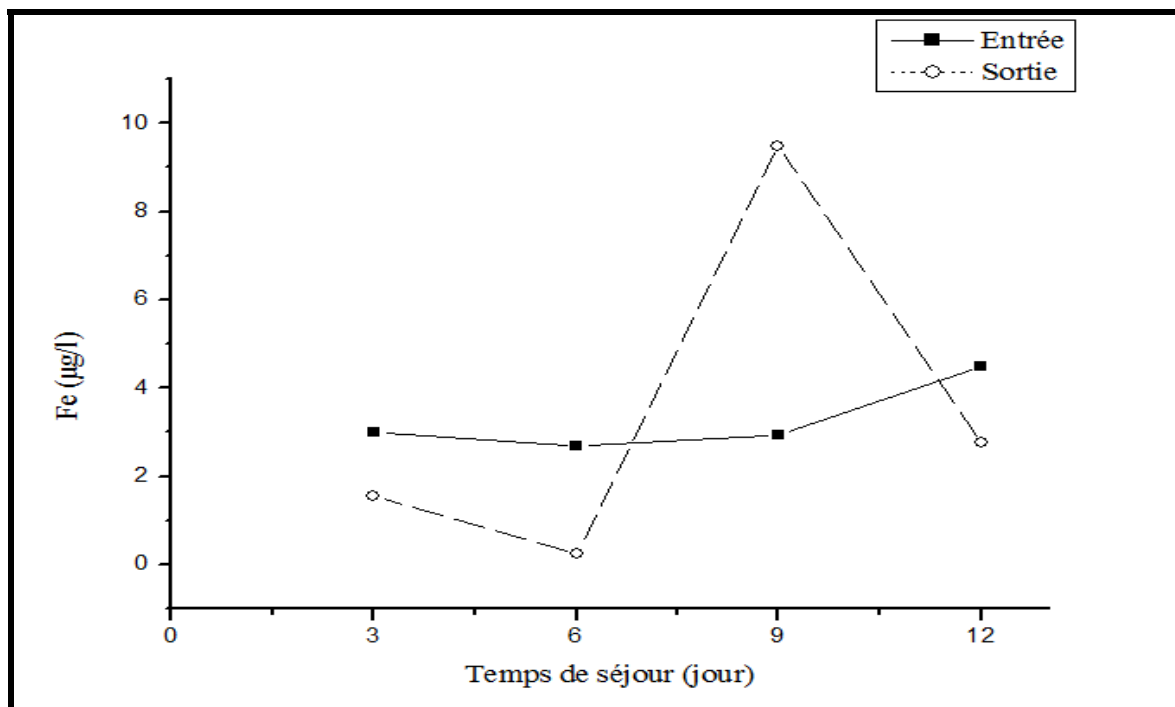


Figure V – 8 : Evolution temporelle du Fe.

Conclusion Générale

CONCLUSION GENERALE

L'étude présentée dans ce mémoire est scindée en deux volets essentiels :

- La conception d'un dispositif expérimental pour l'épuration d'une eau usée.
- Mettre en évidence la capacité épuratoire du système à base de plantes aquatiques conçu.

Les résultats des analyses physico-chimiques effectuées par différentes techniques montrent que :

- Les rendements épuratoires sont satisfaisants en ce qui concerne l'abattement de la charge organique exprimée en DCO évaluée à 90,90 % pour un temps de séjour de 15 jours et une température moyenne de l'air et de l'eau de 15,5°C et 15°C respectivement. La qualité des eaux du filtrat du lit planté de *Phragmites australis* est conforme aux valeurs guides des normes de la qualité des eaux douces superficielles utilisées ou destinées à être utilisées pour la production d'eau destinée à la consommation humaine (30 mg O₂/l) [23] pour un temps de séjour ≥ 9 jours.
- Ce système a par ailleurs fourni une bonne élimination des matières en suspension totale (95,45 %) pour un temps de séjour de 12 jours et pour une température moyenne de l'air et de l'eau de 16,5°C et 15,5°C respectivement. La qualité des eaux du filtrat du lit plantée avec *Phragmites australis* est conforme aux valeurs guides des normes de la qualité des eaux douces superficielles utilisées ou destinées à être utilisées pour la production d'eau destinée à la consommation humaine (25 mg/l) [23] pour un temps de séjour ≥ 12 jours.
- Le fer (Fe) subit également un abattement dans sa concentration à la sortie du système pour un temps de séjour très court évalué à 6 jours pour des températures moyennes de l'air et de l'eau de 11,5°C et 12°C respectivement. Cet abattement est observé pour des concentrations à l'échelle de $\mu\text{g/l}$.

Les résultats obtenus permettent de confirmer la performance globale des systèmes à macrophytes et de mettre en évidence l'efficacité du dispositif conçu à l'expérience pour le traitement des rejets des eaux usées et notamment ceux provenant des zones industrielles.

Le traitement par filtres plantés de *Phragmites australis* (roseaux) apparaît donc comme une technologie fiable, simple à l'exploitation, efficace, adaptable au lieu et capable

d'assimiler les métaux lourds. Ce traitement offre une solution économique nécessitant peu d'entretien d'une part et s'inscrit dans une démarche de développement durable d'autre part.

Les filtres plantés de macrophytes sont une alternative écologique aux stations d'épuration classiques à condition d'œuvrer pour une gestion locale de l'eau qui permettra enfin une gestion durable de ressource en eau.

En perspective, il serait très intéressant de compléter les analyses sur le sol et les plantes afin de mieux quantifier le mode d'élimination des polluants, chose qui permettra la réalisation d'un lit planté de macrophytes à l'aval des unités polluantes avant le versement de leur rejet directement dans les oueds.

Références

Bibliographiques

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] A. DALOZ, L'épuration des eaux usées par les filtres plantés de macrophytes, Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Lyon, Formation continue au développement durable et équitable, Janvier 2007.
- [2] C.T. TANDIA, Contrôle et suivi de la qualité des eaux usées, Protocole de détermination des paramètres physico-chimiques et bactériologiques, Centre régionale pour l'eau potable et l'assainissement à faible coût, Centre collaborant de l'OMS, CREPA, Janvier 2007.
- [3] F. Z. AFRI-MEHENNAOUI, L. SAHLI, S. MEHENNAOUI, Evaluation de la contamination par le cadmium, le plomb et le zinc de l'eau, des sédiments de l'Oued Rhumel et son affluent le Boumerzoug, et leur transfert vers une plante semi-aquatique : *RORIPPA NASTURTIUM-AQUATICUM (L.)*, *Sciences & Technologie C* – N°29 juin (2009), p : 46.
- [4] M. EL YAMANI, Environnement et milieu, Qualité des eaux, Afsset, Avril 2006.
- [5] A. KETTAB, Les ressources en eau en Algérie : stratégies, enjeux et vision, ELSEVIER, Vol. 136 (2001), p : 26.
- [6] P. TSCHERRIG, WRA Informations, Gestion et services publics, Développement durable.
- [7] B. MAGALI, Evaluation de l'efficacité des jardins filtrants pour les traitements des boues urbains et industrielles, MASTER FAGE Biologie et écologie pour la forêt, l'Agronomie et l'Environnement, Spécialité Gestion des Ecosystèmes, Nancy-Université, 2010.
- [8] M. ABISSY, L. MANDI, Utilisation des plantes aquatiques enracinées pour le traitement des eaux usées urbaines : cas de roseau, *Revue des sciences de l'eau, Rev. Sci. EAU* 12/2 (1999), p : 288.
- [9] Systèmes de traitement des eaux usées par marais artificiels, Étude de techniques de remplacement applicables à l'assainissement des eaux usées de petites agglomérations, V.3.1, Québec, janvier 1993.
- [10] T. FARTAS, H. ZEGGANE, F. SADAOU, K. BENCHEIKH, Etude des performances épuratoires d'une station d'épuration pilote par macrophytes dans la commune de Temacine, 1^{er} Séminaire International sur la Ressource en eau au Sahara : Evaluation, Economie et Protection, le 19 et 20 janvier 2011 (Ouargla).
- [11] N. F. ALLOUCHE, La Phytoremediation pour la Dépollution des Eaux Usées, Division Bioénergie Et Environnement, Recherche et Développement, *Bulletin des Energies Renouvelables*, N° 10 Décembre 2006.

- [12] L. SOUIKI, H. DJEBAR, R. ROUABHI, D. FADEL, M. R. DJEBAR, Biological Purification of Wastewater in Batch Culture: Process Technology Phragmifilter, American-Eurasian Journal of Toxicological Sciences, IDOSI Publications 2010, 2 (1), p: 30.
- [13] S. TIGLYENE, L. MANDI et A. E. JAOUAD, Enlèvement du chrome par infiltration verticale sur lits de Phragmites australis (Cav.) Steudel, Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, vol. 18, n° 2, 2005, p : 180.
- [14] C. BAWIN, J. BELLON, C. BAVY, Livre bleu, Edition BELGAQUA, 2008, Fédération Belge du secteur de l'eau ASBL.
- [15] [www. Encyclopédie scientifique en ligne.htm](http://www.encyclopedie-scientifique-en-ligne.htm)
- [16] [www. Découvrir l'eau.htm](http://www. Decouvrir l'eau.htm)
- [17] www. Eau - Encyclopédie Universalis.htm
- [18] J. BOEGLIN, Propriétés des eaux naturelles, Technique de l'ingénieur, traité l'environnement, G₁ 110.
- [19] J. BOEGLIN, Pollution industrielle de l'eau (Caractérisation, classification, mesure), Technique de l'ingénieur, traité l'environnement, G₁ 210.
- [20] R. SALGHI, Différents filières de traitement des eaux, cours préparés, Université Ibn Zohr, Agadir, Maroc.
- [21] R. DESJARDINS, Le traitement des eaux, 2^{ème} édition, 1997, édition de l'école polytechnique de Montréal.
- [22] DEGREMONT, Mémento technique de l'eau, Tome 1, 9^{ème} édition, 1989.
- [23] J. BONTOUX, Introduction à l'étude des eaux douces (eaux naturelles, eaux usées, eaux de boisson), CEBEDOC, 1993, Belgique.
- [24] LAEASE, groupe technologique de Santé, 2009, site d'internet : www.laease.com
- [25] F. GALAF, S. GHANNAM, Contribution à l'élaboration d'un manuel et d'un site web sur la pollution du milieu marin, Maroc, 2003.
- [26] A. DECAUX, Pollution des eaux superficielles et solutions de traitement, Université de Picardie Jules Verne, 1999-2000.
- [27] J. RODIER, L'analyse de l'eau (eaux naturelles- eaux résiduaires- eau de mer), 7^{ème} édition, Dunod, 1996, Paris.
- [28] L. DJABRI, Mécanismes de la pollution et vulnérabilité des eaux de la Seybouse, origine géologiques, industrielles, agricoles et urbaines, thèse de doctorat d'état, université d'Annaba, Algérie, 1996.
- [29] M. DORE, Chimie des oxydants et traitement des eaux, Editeur : Tec Et Doc, 1993, l'université de Poitiers (E.S.I.P).

- [30] A. MIZI, traitement des eaux de rejets d'une raffinerie des corps gras région de Bejaia et valorisation de déchets oléicoles, Thèse de doctorat d'état, université d'Annaba, Algérie, 2006.
- [31] G. MIQUEL, Rapport sur : Les effets des métaux lourds sur l'environnement et la santé, Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, Avril 2001.
- [32] Séquence 1 – SN11, Une ressource indispensable : l'eau, Cned – Académie en ligne.
- [33] A. MAKHLOUFI, DJ. ABDELOUAHID, Etude de la qualité physicochimique et microbiologique de l'eau potable dans la ville de Bechar. Sud ouest Algérie, 1^{er} Séminaire International sur la Ressource en eau au Sahara : Evaluation, Economie et Protection, le 19 et 20 janvier 2011 (Ouargla).
- [34] Lycée Régional du Bâtiment et des Travaux Publics « Saint-Lambert », Le cycle de l'eau, L'eau potable, Site Internet : <http://lyc-du-batiment-saint-lambert.scola.ac-paris.fr>
- [35] S. BOULAHNECHE, Etude et évaluation du risque lié à la présence de l'aluminium résiduel dans l'eau potable de la station de "Hamadi – Kroum" de Skikda, Université 20 Août 1955 Skikda, Algérie, 2010.
- [36] P. MOUCHET, Traitement des eaux avant utilisation. Filière et application, Technique de l'ingénieur, traité l'environnement, G₁ 172.
- [37] J. RODIER et coll., L'analyse de l'eau (eaux naturelles- eaux résiduaires- eau de mer), 8^{ème} édition, Dunod, 2005, Paris.
- [38] A. CHIEUB, I. SAIFI, S. DIB, Etude de la coagulation floculation des eaux de surfaces "Oued El Athmania", Université Mentouri Constantine, Algérie, 2007.
- [39] I. BENLEHZIL, K. BOUSSAA, N. ZAROUD, Cycle d'azote et ses effets polluants dans les eaux du barrage Hammam-Grouz, Université Mentouri Constantine, Algérie, 1995.
- [40] F. BERNE, J. CORDON, traitement des eaux, Editions TECHNEP, 1991, Paris.
- [41] H. SAMAKE, Analyse physico-chimique bactériologique au L.N.S des eaux de consommation de la ville de Bamako durant la période 2000 et 2001, Thèse de doctorat d'état en Pharmacie, Université de Bamako, Mali, 2001-2002.
- [42] www.sivoa.fr
- [43] La qualité et les analyses d'eau, French ACF.
- [44] E. HORNUNG, Définir une stratégie de valorisation des boues de lagune à la Sucrierie d'Erstein, Strasbourg, 2006.
- [45] A.GAÏD, Traitement des eaux usées urbaines, Technique de l'ingénieur, C₅ 220.
- [46] La qualité de l'eau, Eau_DU. Pdf.

- [47] C. BATIOU, C. EMBLANCH, B. BALVOUX, Carbone organique total (COT) et magnésium (Mg^{2+}): deux traceurs complémentaires du temps de séjour dans l'aquifère karstique, Elsevier, Géoscience, V 335 (2003), P 206.
- [48] Dossier d'information, La qualité de l'eau potable en France, Aspects sanitaires et réglementaires, Direction générale de la Santé, septembre 2005.
- [49] La qualité du l'eau de robinet, Centre d'information sur l'eau, Document C.I.eau.
- [50] B.FESTY, P. HARTEMANN, M. LEDRANS, P. LEVALLOIS, P. PAYEMENT, D. TICARD, Qualité de l'eau, Chapitre 13, In : Environnement et santé publique – Fondements et pratiques, pp.333-368, 2003, Paris.
- [51] ATELIER REEB, L'épuration des eaux usées par filières plantées de macrophytes, Une alternative pour les petites et moyennes collectivités, Epuration Fontaines Jardins D'eau, site d'internet : www.atelier-reeb.fr
- [52] L. M. BENSMINA, H. MANCER, M. DEBABECHE, Analyse du Pouvoir Epuratoire D'un Filtre Implante de Phragmite Australis Pour le Traitement des Eaux Usées Sous Climat Sem - Aride - Region de Biskra, Journal International Environmental Conflict Management, Santa Catarina – Brazil, 1(1), Dez. 2010, p : 11.
- [53] F. SEKIOU, E. MOKHTARI, N. MAROUF, H. SAIFI, Rapport : Etude de l'amélioration de la qualité des eaux par bassin d'épuration à plantes macrophytes des oueds du bassin versant Kebir Rhumel du système hydraulique de Beni Haroun, Unité de recherche, Université Laarbi Ben M'hidi, Oum El Bouaghi, Algérie, 2010.
- [54] FLORE, Roseau phragmite Phragmites australis (Cav.) Steud, Rédaction Ayal et Alii pour le courant alternatif. Fiche N°39.
- [55] I. ROYER, BULLETIN-AQSSS, Association Québécoise De Spécialistes En Sciences Du Sol, Volume XVI, Numéro 1, Dépôt Légal Bibliothèque nationale du Québec, Février 2006.
- [56] R. DELEPINE, J. GAILLARD, P. MORAND, Valorisation des algues et autres végétaux aquatiques, Transpiration Journalière, Distribution géographique et polyploïdie chez le roseau, Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer, IFREMER. 1988.
- [57] L. GRENON, I. ROYER, Association Québécoise De Spécialistes En Sciences Du Sol, 19^e Congrès annuel, Edition préliminaire, Centre Euro-Spa – Saint-Ignace-de-Stanbridge, 13 au 16 juin 2005.
- [58] Y. BEDARD, M. LAFRANCE, C. LAVAOIE, J. BRISSON, S. DEBOIS, F. BELZILE, l'invasion du réseau autoroutier du Québec par le Roseau Commun (Phragmites Australis), Exposé préparé pour la séance sur la gestion de la propagation de plantes

envahissantes du congrès annuel de 2008 de l'Association des transports du Canada à Toronto (Ontario).

[59] CNIDE – CNFME, Bilan de fonctionnement des procédés de traitement des eaux usées pour les stations d'épuration de petite capacité du bassin Loire-Bretagne, Recommandations pour l'exploitation des filtres plantés de roseaux à écoulement vertical et Synthèse bibliographique, Office International de l'Eau, Limoges – Juin 2008.

[60] S.I.N.T, Société d'Ingénierie Nature & Technique, Phragmifiltre, La station d'épuration sur filtres plantés de roseau, *Cemagref*.

[61] J.B. POULET, A. TERFOUS, S. DAP & A. GHENAIM, Stations d'épuration à lit filtrants plantés de macrophytes, *Courrier du Savoir* – N°05, Juin 2004, p : 104.

[62] RHONE MEDITERRANEE ET CORSE Agence de l'eau, Groupe Macrophytes et Traitement des Eaux, Epuration des eaux usées domestiques par filtres plantés de macrophytes, Recommandation techniques pour la conception et la réalisation, Version N° 1, 1^{er} Juin 2005.

[63] SATESE, Etude 2008, Filtres plantés de roseau, réalisation et fonctionnement dans le Morbihan, Morbihan Conseil général.

[64] AGENCE DE L'EAU RHÔNE MEDITERRANEE ET CORSE, Epuration des eaux usées par des filtres plantés de macrophytes, Une étude bibliographique, 1999.

[65] T. MARIKA, J. JAANIS, T. JAAK, Microbial biomass, activity and community composition in constructed wetlands, *Science of the Total Environment* 407 (2009), ELSEVIER, Tartu, Estonia, p: 3967.

[66] SEINE α MARNE, Fiche technique sur l'assainissement collectif n°1, La filière filtres plantés de roseaux, Conseil Général de Seine-et-Marne.

[67] J. GHESTEM, Principe de fonctionnement du filtre planté de roseaux, *Chambre d'Agriculture du Nord* – Novembre 2004.

[68] <http://hmf.enseeiht.fr>

[69] S. BERNARD, G. SEMERDJIAN, L'épuration des eaux usées par filtres plantés de roseaux à écoulement verticale : Base de dimensionnement, intérêt et application d'un système à double étage superposés, *Société Phocéenne des eaux*, France.

[70] S. TIGLYENE, A. E. JAOUAD et L. MANDI, Mobilité et spéciation du chrome dans un système à *Phragmites australis* de traitement des eaux usées de tannerie, *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, vol. 21, n° 1, 2008, p : 3.

- [71] UTILISATION DES FILTRES PLANTES DE ROSEAUX EN ASSAUVISSEMENT NON COLLECTIF - *Stage Mars-Avril 2002* -
- [72] C. BOUTIN, S. PROST-BOUCLE, M. BOUCHER, Etude des filtres plantés de roseaux dimensionnés pour des campings, *Domaine Ecotechnologies et Pollutions*, Mars 2010.
- [73] SERVICE QUALITE ENVIRONNEMENT, La station d'épuration des eaux usées à lits plantés de roseaux : la Rhizosphère, Une technologie écologique et performante, Aéroport international Strasbourg, site d'internet : www.strasbourg.aeroport.fr
- [74] I. V. GORDIN, P. P. MARKOU, Système intégré de l'utilisation de l'eau dans l'agroalimentaire, ed. Agropromizdar, 1991, Moscou.
- [75] B. LAPOINTE, Protocoles, % Humidité du sol, 2006,
<http://pages.usherbooke.ca/blapointe/>
- [76] F. ROUABHIA, Elaboration et caractérisation des matériaux céramiques nanostructurés, Université 8 Mai 1945 Guelma, Algérie, 2010.
- [77] La qualité et les analyses d'eau.
- [78] L. AOUATA, A. KELAIYA, Analyse des eaux, Rapport de stage, Centre de formation professionnel et de l'apprentissage "SABE ALI", Guelma, 2009-2010.
- [79] PROTOCOLE DE DETERMINATION DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES ET BACTERIOLOGIQUES, Guide, Contrôle et suivi de la qualité des eaux usées, Centre Régional Pour l'Eau Potable et l'Assainissement à Faible Coût, Centre Collaborant de l'OMS, CREPA, Janvier 2007.
- [80] J. M. P. OUATTARA, L. COULIBALY, P. N. MANIZAN, G. GOURENE, Traitement des Eaux Résiduaires Urbaines par un Marais Artificiel à Drainage Vertical Planté Avec *Panicum Maximum* sous Climat Tropical, *European Journal of Scientific Research*, V 23 No.1 (2008), p : 28.
- [81] J. RODIER, B. LEGUBE, N. MERLET et coll., L'analyse de l'eau, 9^{ème} édition, Dunod, 2009, Paris.
- [82] J. MOUTTE, Notes sur l'analyse par spectrométrie d'émission atomique à source plasma, Département de Géologie, Ecole des mines de Saint Etienne.

Annexes

Annexe I

Description d'un spectrophotomètre d'émission à source Plasma

La spectrométrie d'émission à l'aide d'un générateur inductif de plasma est généralement appelée ICP (*Inductively Coupled Plasma*) ou PIHF (Plasma Induit par Haute Fréquence). Cette technique, relativement récente qui offre des possibilités intéressantes : une sensibilité en général supérieure à la spectrométrie d'absorption atomique avec flamme, peu d'interférences, la détermination simultanée de nombreux éléments sur les appareillages multicanaux [37].

- **Principe**

L'analyse par spectrométrie d'émission atomique repose sur l'étude des radiations émises par les atomes passés dans un état excité, généralement ionisé. Pour dissocier les échantillons en leurs éléments constitutifs, on utilise ici un plasma

Le gaz utilisé en ICP est l'argon : $Ar \leftrightarrow Ar^+ + e^-$ [81].

Les éléments introduits dans le plasma passent à l'état d'atome; ils sont excités et, en revenant à l'état fondamental, émettent des photons qui en permettent l'analyse à l'aide d'un mono ou polychromateur [37].

- **Notion de Plasma**

Un plasma est un mélange gazeux à haute température de particules neutres (atomes, molécules) et de particules chargées (électrons, ions) [81].

On peut considérer que le plasma constitue un quatrième état de la matière, faisant suite aux trois états solide, liquide et gaz. Les plasmas conservent certaines propriétés des gaz (compressibilités, pression proportionnelle à la température absolue, ...), par contre, les propriétés électromagnétiques en diffèrent du fait de la présence d'électrons en mouvement".

En analyse, les plasmas constituent des sources de températures plus élevées (8000 à 10000K) que celles produites par les flammes et autres décharges (arc ou étincelle). Les plasmas ont donc été utilisés depuis les années 1970 en spectrométrie d'émission atomique, en remplacement des flammes classiques.

Le rôle du plasma, dans l'analyse par émission optique, est :

- de casser les liaisons moléculaires
- pour produire des ions et atomes libres,

- et d'exciter ces particules.

Des développements plus récents (à partir de 1985) ont conduit à utiliser aussi cette source d'ions que constitue le plasma en tant que source d'un spectromètre de masse: il s'agit alors de "spectrométrie de masse à source plasma" [83].

- **Matériel**

À l'aide d'un nébuliseur approprié, l'échantillon à analyser est introduit dans ce plasma où règnent des températures élevées (5 000 à 8 000 °C), ce qui provoque la dissociation totale des constituants des échantillons (désolvation, atomisation et ionisation). Soumis à ces températures élevées, l'élément chimique est excité (comme en émission de flamme) et retourne à l'état fondamental en perdant son excédent d'énergie par émission de radiations qui lui sont caractéristiques. Pour un élément, cette émission optique des atomes conduit à un spectre d'émission complexe avec une multitude de radiations accompagnées d'un fond continu. Il est donc nécessaire de disposer de systèmes élaborés pour analyser ces spectres et accéder à une analyse multiélémentaire quantitative des constituants de l'échantillon.

Pour repérer les radiations spécifiques de l'élément à analyser on utilise en ICP un système optique pour séparer les différentes radiations émises (mono ou polychromateur). Et un système de détection et amplification constitué d'un ou plusieurs photomultiplicateurs.

Un spectromètre d'émission à plasma est généralement constitué :

- d'une source à plasma : générateur de haute fréquence (2 à 30 MHz) couplé inductivement à une torche généralement refroidie à l'eau ;
- d'un système de nébulisation : soit pneumatique, soit à ultrasons (ce qui améliore d'un facteur 10 environ la sensibilité) ;
- d'un mono ou polychromateur dans le cas d'analyse multiéléments ;
- d'un système de détection et amplification constitué d'un ou plusieurs photomultiplicateurs et d'un étage d'amplification [82].

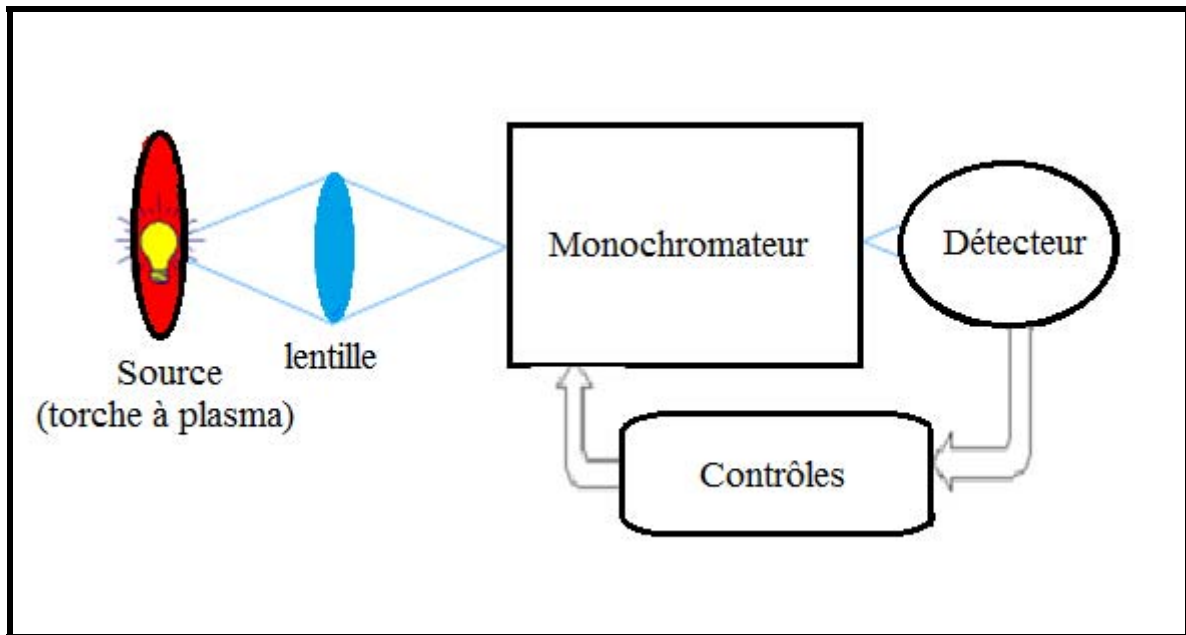


Schéma générale d'un spectromètre [83].

- **Limites de détection usuelles**

Les limites de détection dépendent de la matrice de l'échantillon et des interférences rencontrées. Elles sont également influencées par l'appareillage utilisé ainsi que par la qualité des installations de traitement de l'air des laboratoires qui conditionne la contamination des blancs.

Dans les eaux naturelles, les limites de détection varient généralement en ICP, entre 1 et 10 $\mu\text{g/l}$ pour la majorité des éléments dosés,

Le tableau suivant donne des exemples de limites de détection qui peuvent être obtenues en ICP [82].

Elément	Longueurs d'ondes habituellement utilisées nm	Limite de détection usuelle µg/l
Ag	328,068 328,289	1
Al	396,153 308,215	3
As	188,973 193,959	5
B	208,959 249,678	2
Ba	233,527 455,403	0,3
Bi	223,061	10
Ca	315,887 317,933 393,366	100 20 2
Cd	214,438 228,502	0,3
Co	228,616	1
Cr	205,552 267,716	1
Cu	324,752 327,396	1
Fe	259,940 238,204	1
K	766,490 769,000	20
Li	670,784	2
Mg	279,079 285,213	20
Mn	257,610 259,376	0,5
Mo	202,030 204,598	5
Ni	231,604 221,648	2
P	177,499 213,604	20 50
Pb	220,353 217,000	5
Sb	206,833 217,600	20
Se	196,026 203,985	20
Si	251,611	10
Sn	235,848 189,980	50
Sr	407,771 421,552	0,5 10
V	290,882 292,402	1
Zn	206,191 213,857	1

Annexe II

**Exigences de qualité des eaux douces superficielles utilisées ou destinées à être utilisées
pour la production d'eau destinée à la consommation humaine [23]**

G : Valeur guide

I : Valeur limite impérative

Groupes de paramètres	Paramètres	A ₁		A ₂		A ₃	
		G	I	G	I	G	I
Paramètres organoleptique	Coloration (après filtration simple) mg/l (échelle Pt)	10	20	50	100	50	200
	Odeur (facteur de dilution à 25°C)	3		10		20	
Paramètres physico-chimiques liés à la structure naturelle des eaux	Conductivité $\mu\text{S/cm}$ à 20°C	1000		1000		1000	
	Température (°C)	22	25	22	25	22	25
	pH (unité pH)	6.5-8.5		5.5-9		5.5-9	
	Chlorures (mg/l Cl)	200		200		200	
	Sulfates (mg/l SO ₄)	150	250	150	250	150	250
	Matières en suspension (mg/l)	25					
	Demande biochimique en oxygène (DBO ₅) à 20°C sans nitrification (mg/l O ₂)	<3		<5		<7	
	Demande chimique en oxygène (DCO) (mg/l O ₂)					30	
Taux de saturation en oxygène dissous (% O ₂)	>70		>50		>30		

Groupes de paramètres	Paramètres	A1		A2		A3	
		G	I	G	I	G	I
Paramètres concernant les substances indésirables	Nitrates (mg/l NO ₃)	25	50		50		50
	Ammoniaque (mg/l NH ₄)	0.05		1	1.5	2	4
	Azote Kjeldahl (NO ₃ excepté (mg/l N))	1		2		3	
	Hydrocarbures dissous ou émulsionnés après extraction par éther de pétrole (mg/l)		0.05		0.2	0.5	1
	Phénols (indice phénol) para-nitraniline 4 aminoantipyrine (mg/l C ₆ H ₅ OH)		0.001	0.001	0.005	0.01	0.1
	Agents de surface réagissant au bleu de méthylène (mg/l lauryl-sulfate)	0.2		0.2		0.5	
	Substance extractibles au chloroforme (mg/l)	0.1		0.2		0.5	
	Fer dissous (mg/l Fe)	0.1	0.3	1	2	1	
	Manganèse (mg/l Mn)	0.05		0.1		1	
	Cuivre (mg/l Cu)	0.02	0.05	0.05		1	
	Zinc (mg/l Zn)	0.5	3	1	5	1	5
	Phosphore (mg/l P ₂ O ₅)	0.4		0.7		0.7	
	Fluor (mg/l F)	0.7-1	1.5	0.7-1.7		0.7-1.7	
	Bore (mg/l B)	1		1		1	
	Baryum (mg/l Ba)		0.1		1		1

Groupes de paramètres	Paramètres	A1		A2		A3	
		G	I	G	I	G	I
Paramètres concernant les substances toxiques	Arsenic ($\mu\text{g/l As}$)	10	50		50	50	100
	cadmium ($\mu\text{g/l Cd}$)	1	5	1	5	1	5
	Cyanures ($\mu\text{g/l CN}$)		50		50		50
	Chrome total ($\mu\text{g/l Cr}$)		50		50		50
	Plomb ($\mu\text{g/l Pb}$)		50		50		50
	Mercure ($\mu\text{g/l Hg}$)	0.5	1	0.5	1	0.5	1
	Sélénium ($\mu\text{g/l Se}$)		10		10		10
	Hydrocarbures Polycycliques Aromatiques Total 6 substances visées par décret 03/01/89 ($\mu\text{g/l}$)		0.2		0.2		1
Pesticides	Total : Parathion, HCH, dieldrine ($\mu\text{g/l}$)		1		2.5		5
Parameters micro-biologiques	Coliformes totaux 37°C (100 ml)	50		5000		50000	
	Streptocoques fécaux (100 ml)	20		1000		10000	
	Salmonelles	Absence dans 5000 ml		Absence dans 1000 ml			