

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOHAMED KHIDER – BISKRA –

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

Département des Sciences Agronomiques

N° d'ordre :

Série :



MEMOIRE DE MAGISTER

Spécialité : Sciences Agronomiques

Option : Agriculture et environnement dans les régions arides

Présenté par :

BENGOUGA Khalila

Ingénieur Agronome

THEME

**CONTRIBUTION A L'ETUDE DU ROLE DE LA
VEGETATION DANS L'EPURATION DES EAUX
USEES DANS LES REGIONS ARIDES**

Soutenu le : 25/10/2010

Devant le jury :

Président :	OMARI Mahmoud	Professeur	Université de Biskra
Examineur :	BARKAT Djamel	Professeur	Université de Biskra
Examineur :	BELHAMRA Mohamed	Maître de Conférences 'A'	Université de Biskra
Rapporteur :	DEBABECHE Mahmoud	Professeur	Université de Biskra

INTRODUCTION GENERALE

L'épuration par filtres plantés à macrophytes est le moyen le moins onéreux et le plus naturel pour le traitement des eaux usées urbaines. En effet, cette technique d'épuration dite *phytoépuration* commence à se répandre de plus en plus en Amérique et en Europe. La phytoépuration veut dire l'action de l'épuration des eaux usées en présence de plantes. Elle peut être réalisée à travers différents systèmes, caractérisés par le fait que l'eau vient couler lentement et sous conditions contrôlées à l'intérieur de milieux végétaux, de façon à en favoriser la dépurabilité naturelle, qui s'effectue à cause du processus d'aération, sédimentation, absorption et métabolisation de la part des microorganismes et de la flore. Les systèmes de phytoépuration sont utilisés pour la dépurabilité des eaux de différentes provenances et avec caractéristiques différentes (Borin, 2003).

Cette technique d'épuration trouve son intérêt surtout dans les régions rurales, où les eaux usées traitées peuvent être réutilisées pour l'irrigation. Elle présente également l'avantage de consommer très peu d'énergie pour son fonctionnement contrairement à la technique classique (ou à boue activée) qui consomme beaucoup d'énergie et présente l'inconvénient des boues décantées qui s'accumulent en amont et nécessite un nettoyage fréquent. Les stations de phytoépuration s'intègrent parfaitement dans le paysage, sans aucun impact négatif. On peut dire que cette technique respecte l'homme et la nature.

En Algérie, à l'exception de la station expérimentale de phytoépuration qui se trouve à Timacine, aucune installation de ce type n'est réalisée, et c'est justement la raison pour laquelle nous sommes penchés sur la question. Pour cet objectif, l'étude se propose d'analyser expérimentalement les potentialités épuratrices de quelques types de plantes macrophytes, à savoir : *Bambusa.sp*, *Cyperus papyrus*, *Phragmites communis* et *Nerium oleander*. L'étude aura pour finalité de présenter les rendements épuratoires de ces plantes après analyse sur une période de 3 mois, moyennant les paramètres physicochimiques.

Cette étude a nécessité cinq chapitres :

- le premier chapitre donne un aperçu sur la définition, l'origine et les caractéristiques des eaux usées, ainsi que les différentes méthodes utilisées pour leur épuration.
- le second chapitre a pour objectif de décrire en détaille le principe de la phytoépuration.

- Le troisième chapitre sera entièrement consacré à la présentation des caractéristiques climatiques de la région de Biskra et en particulier l'université de Biskra où ont été effectués les essais expérimentaux.
- Le quatrième chapitre de ce mémoire sera dédié à la démarche expérimentale suivie, afin d'évaluer le pouvoir épurateur des quatre plantes macrophytes.
- Le cinquième et dernier chapitre sera exclusivement consacré à l'interprétation des résultats obtenus.

1.1. Généralités sur les eaux usées

En parlant de l'eau usée il semble important d'avoir une idée sur sa définition, son origine et ses caractéristiques, ainsi que les différentes méthodes utilisées pour son épuration.

1.1.1. Définition

Selon REJSEK (2002), les eaux résiduaires urbaines (ERU), ou eaux usées, sont des eaux chargées de polluants, solubles ou non, provenant essentiellement de l'activité humaine. Une eau usée est généralement un mélange de matières polluantes répondant à ces catégories, dispersées ou dissoutes dans l'eau qui a servi aux besoins domestiques ou industriels. (GROSCLAUDE, 1999). Donc sous la terminologie d'eau résiduaire, on groupe des eaux d'origines très diverses qui ont perdu leurs puretés ; c'est-à-dire leurs propriétés naturelles par l'effet des polluants après avoir été utilisées dans des activités humaines (domestiques, industrielles ou agricoles).

1.1.2. Origine des eaux usées

D'après RODIER et al (2005), On peut classer comme eaux usées, les eaux d'origine urbaines constituées par des eaux ménagères (lavage corporel et du linge, lavage des locaux, eaux de cuisine) et les eaux vannes chargées de fèces et d'urines ; toute cette masse d'effluents est plus ou moins diluée par les eaux de lavage de la voirie et les eaux pluviales. Peuvent s'y ajouter suivant les cas les eaux d'origine industrielle et agricole. L'eau, ainsi collectée dans un réseau d'égout, apparaît comme un liquide trouble, généralement grisâtre, contenant des matières en suspension d'origine minérale et organique à des teneurs extrêmement variables. En plus des eaux de pluies, les eaux résiduaires urbaines sont principalement d'origine domestique mais peuvent contenir des eaux résiduaires d'origine industrielle d'extrême diversité. Donc les eaux résiduaires urbaines (ERU) sont constituées par :

- Des eaux résiduaires ou eaux usées d'origine domestique, industrielle et/ou agricole
- Des eaux pluviales ou de ruissellement urbain.

1.1.2.1. Origine industrielle

Les déchets et les effluents industriels définissent largement la qualité et le taux de pollution de ces eaux usées. Les établissements industriels utilisent une quantité importante d'eau qui tout en restant nécessaire à leur bonne marche, n'est réellement consommée qu'en très faible partie le reste est rejeté. On peut néanmoins, faire un classement des principaux rejets industriels suivant la nature des inconvénients qu'ils déversent :

- Pollution due aux matières en suspension minérales (Lavage de charbon, carrière, tamisage du sable et gravier, industries productrices d'engrais phosphatés....) ;
- Pollution due aux matières en solution minérales (usine de décapage, galvanisation...);
- Pollution due aux matières organiques et graisses (industries agroalimentaires, équarrissages, pâte à papier...);
- Pollution due aux rejets hydrocarbonés et chimiques divers (raffineries de pétrole, porcherie, produits pharmaceutiques.....);
- Pollution due aux rejets toxiques (déchets radioactifs non traités, effluents radioactifs des industries nucléaires....).

Les eaux résiduaires d'origine industrielle ont généralement une composition plus spécifique et directement liée au type d'industrie considérée. Indépendamment de la charge de la pollution organique ou minérale, de leur caractère putrescible ou non, elles peuvent présenter des caractéristiques de toxicité propres liées aux produits chimiques transportés. (RODIER, 2005).

1.1.2.2. Origine domestique

Les effluents domestiques sont un mélange d'eaux contenant des déjections humaines : urines, fèces (eaux vannes) et eaux de toilette et de nettoyage des sols et des aliments (eaux ménagères).

Ces eaux sont généralement constituées de matières organiques dégradables et de matières minérales, ces substances sont sous forme dissoute ou en suspension. Elles se

composent essentiellement par des eaux de vanne d'évacuation de toilette. Et des eaux ménagères d'évacuation des cuisines, salles de bains.

Elles proviennent essentiellement :

- Des eaux de cuisine qui contiennent des matières minérales en suspension provenant du lavage des légumes, des substances alimentaires à base de matières organiques (glucides, lipides, protides) et des produit détergents utilisés pour le lavage de la vaisselle et ayant pour effet la solubilisation des graisses ;
- Des eaux de buanderie contenant principalement des détergents ;
- Des eaux de salle de bain chargées en produits utilisés pour l'hygiène corporelle, généralement des matières grasses hydrocarbonées ;
- Des eaux de vannes qui proviennent des sanitaires (w.c), très chargées en matières organiques hydrocarbonées, en composés azotés, phosphatés et microorganisme. (REJSEK, 2002)

1.1.2.3. Origine agricole

Ce sont des eaux qui ont été polluées par des substances utilisées dans le domaine agricole. Dans le contexte d'une agriculture performante et intensive, l'agriculteur est conduit à utiliser divers produits d'origine industrielle ou agricole dont certains présentent ou peuvent présenter, des risques pour l'environnement et plus particulièrement pour la qualité des eaux. Il s'agit principalement :

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

Donc ces eaux sont l'issus :

- Des apports directs dus aux traitements des milieux aquatiques et semi-aquatiques tels que le désherbage des plans d'eau, des zones inondables

(faucardage chimique) et des fossés, ainsi que la démoüstication des plans d'eau et des zones inondables (étangs et marais).

- Des apports indirects dus en particulier à l'entraînement par ruissellement, aux eaux de rinçage des appareils de traitement, aux résidus présents dans des emballages non correctement rincés ou détruits, aux eaux résiduelles des usines de fabrication et de conditionnement. (GROSCLAUDE ;1999).

1.1.3. Caractéristiques des eaux usées

Dans ce sous chapitre nous passerons en revue les principaux paramètres physico-chimiques analysés au cours de la partie expérimentale ainsi que les paramètres bactériologiques les plus rencontrés dans les eaux usées.

1.1.3.1. Paramètres Physiques

1.1.3.1.1. La 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. (RODIER et AL, 2005).

1.1.3.1.2. La matière en suspension (MES)

Selon REJSEK (2002), la pollution particulaire est due à la présence de particules de grande taille, supérieure à $10\mu\text{m}$, en suspension dans l'eau, et que l'on peut assimiler aux matières en suspension (MES). En fait, les matières en suspension ne sont des particules solides véritablement en suspension que dans des conditions moyenne d'écoulement des effluents correspondant à une vitesse minimale de 0,5 m/s. En fonction de la taille des particules, on distingue les matières grossières ou décantables (diamètre supérieur à $100\mu\text{m}$) et les matières en suspension. On peut également prendre en compte une partie des matières colloïdales, de dimension inférieure, qui constituent la limite entre la phase solide et la phase dissoute (entre 1 et $10^{-2}\mu\text{m}$).

1.1.3.2. Paramètres Organoleptiques

1.1.3.2.1. La Turbidité

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

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

1.1.3.2.2. La couleur

Une eau pure observée sous une lumière transmise sur une profondeur de plusieurs mètres émet une couleur bleu clair car les longueurs d'ondes courtes sont peu absorbées alors que les grandes longueurs d'onde (rouge) sont absorbées très rapidement. (REJESK, 2002). La coloration d'une eau est dite vraie ou réelle lorsqu'elle est due aux seules substances en solution. Elle est dite apparente quand les substances en suspension y ajoutent leur propre coloration. (RODIER et Al, 2005).

1.1.3.3. Paramètres Chimiques

1.1.3.3.1. Le potentiel Hydrogène (pH):

L'acidité, la neutralité ou l'alcalinité d'une solution aqueuse peut s'exprimer par la concentration en H_3O^+ (noté H^+ pour simplifier). De manière à faciliter cette expression ; on utilise le logarithme décimal de l'inverse de la concentration en ion H^+ : c'est le pH. (MATHIEU et PIELTAIN, 2003).

$$pH = \log 1/[H^+]$$

1.1.3.3.2. La Conductivité

La conductivité est la propriété que possède une eau de favoriser le passage d'un courant électrique. Elle est due à la présence dans le milieu d'ions qui sont mobiles dans un champ électrique. Elle dépend de la nature de ces ions dissous et de leurs concentrations. (REJSEK, 2002). La conductivité électrique d'une eau est la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes métalliques de 1 cm^2 .

L'unité de conductivité est le siemens par mètre (S/m).

$$1 \text{ S/m} = 10^4 \mu\text{S/cm} = 10^3 \text{ mS/m. (RODIER, 2005).}$$

1.1.3.3.3. L'Oxygène Dissous

L'oxygène dissous est un composé essentiel de l'eau car il permet la vie de la faune et il conditionne les réactions biologiques qui ont lieu dans les écosystèmes aquatiques.

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

La concentration en oxygène dissous est exprimée en $\text{mg O}_2 \text{ l}^{-1}$ (REJSEK, 2002).

1.1.3.3.4. La Demande Chimique en Oxygène (DCO)

La demande chimique en oxygène (DCO) est la quantité d'oxygène consommée par les matières existantes dans l'eau et oxydables dans des conditions opératoires définies. En fait la mesure correspond à une estimation des matières oxydables présentes dans l'eau quelque soit leur origines organique ou minérale.

La DCO étant fonction des caractéristiques des matières présentes, de leurs proportions respectives, des possibilités de l'oxydation. (RODIER, 2005).

La DCO est la concentration, exprimée en mg.L^{-1} , d'oxygène équivalente à la quantité de dichromates consommée par les matières dissoutes et en suspension lorsqu'on traite un échantillon d'eau avec cet oxydant dans des conditions définies par la norme. (REJSEK, 2002).

1.1.3.3.5. La Demande Biochimique en Oxygène (DBO)

Pratiquement, la demande biochimique en oxygène devrait permettre d'apprécier la charge du milieu considéré en substances putrescibles, son pouvoir auto-épurateur et d'en déduire la charge maximale acceptable, principalement au niveau des traitements primaires des stations d'épuration. (RODIER, 2005).

Selon REJSEK (2002), la demande biochimique en oxygène après 5 jours (DBO_5) d'un échantillon est la quantité d'oxygène consommé par les microorganismes aérobies présents dans cet échantillon pour l'oxydation biochimique des composés organiques et/ou inorganiques.

1.1.3.3.6. L'azote

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

1.1.3.3.7. Les nitrates

Les nitrates se trouvant naturellement dans les eaux provenant en grande partie de l'action de l'écoulement des eaux sur le sol constituant le bassin versant. Leurs concentrations naturelles ne dépassent pas 3 mg /L dans les eaux superficielles et quelques mg/L dans les eaux souterraines. La nature des zones de drainage joue donc un rôle essentiel dans leur présence et l'activité humaine accélère le processus d'enrichissement des eaux en nitrates. La teneur en nitrates est en augmentation ces dernières années, de l'ordre de 0,5 à 1 mg/l/an, voire 2 mg/l/an dans certaines régions. Cette augmentation a plusieurs origines :

- Agricole : agriculture intensive avec utilisation massive d'engrais azoté ainsi que rejets d'effluents d'élevage. Cette source représente les 2/3 de l'apport en nitrates dans le milieu naturel ;

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

Cette source représente les 2/9 des apports,;

- Industrielle : rejet des industries minérales, en particulier de fabrication des engrais azotés. Cette source représente 1/9 des apports. (REJSEK, 2002)

1.1.3.3.8. L'azote ammoniacal

Pour désigner l'azote ammoniacal, on utilise souvent le terme d'ammoniaque qui correspond aux formes ionisées (NH_4^+) et non ionisées (NH_3) de cette forme d'azote.

L'ammoniaque constitue un des maillons du cycle de l'azote. Dans son état primitif, l'ammoniac (NH_3) est un gaz soluble dans l'eau, mais, suivant les conditions de pH, il se transforme soit en un composé non combiné, soit sous forme ionisée (NH_4^+). Les réactions réversibles avec l'eau sont fonction également de la température et sont les suivantes :



1.1.3.3.9. Le Phosphore

Le phosphore peut exister dans les eaux en solution ou en suspension, à l'état minéral ou organique. Les composés phosphorés qui, sans hydrolyse ou minéralisation, répondent au test spectrophotométrique sont considérés comme étant des orthophosphates. L'hydrolyse en milieu acide fait apparaître le phosphore hydrolysable et minéralisation, le phosphore organique. Chaque fraction (phosphore en solution ou en suspension) peut être séparé analytiquement en orthophosphates, phosphore hydrolysable et phosphore organique.

Suivant les cas, la teneur en phosphates peut être exprimée en mg/L de PO_4 ou de P_2O_5

$$1\text{mg/L } \text{PO}_4 = 0,747 \text{ mg/L } \text{P}_2\text{O}_5 = 0,326 \text{ mg/L } \text{P} \quad (\text{RODIER};2005).$$

1.1.3.3.10. Le sulfate

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

1.1.3.4. Paramètres Bactériologiques :

Les bactéries sont ubiquitaires dans la nature car il s'agit probablement des premiers êtres vivants apparus sur la terre (archéobactéries). Seules quelques dizaines d'espèces sont adaptées à l'homme : la plupart sont inoffensives ou même utiles, étant commensales et faisant partie des flores cutanées, digestive, buccale, génitale ; certaines sont pathogènes, opportunistes ; une minorité est régulièrement pathogène. (RODIER, 2005).

Vu leur rôle dans le processus, il nous a paru utile l'étude de quelques bactéries les plus rencontrées :

1.1.3.4.1. Les coliformes :

Sous le terme de « coliformes » est regroupé un certain nombre d'espèces bactériennes appartenant en fait à la famille des *Enterobacteriaceae*.

La définition suivante a été adoptée par l'Organisation Internationale de Standardisation (ISO) :

« Bacille à Gram négatif, non sporogène, oxydase négative, facultativement anaérobie, capable de croître en présence de sels biliaires ou d'autres agents de surface possédant des activités inhibitrices de croissance similaire, et capable de fermenter le lactose (et le mannitol) avec production d'acide et d'aldéhyde en 48 h, à des températures de 35 à 37 C° ». (REJSEK, 2002).

Les coliformes comprennent les genres : *Echerichia*, *Citrobacter*, *Enterobacter*, *Klebsiella*, *Yersinia*, *Serratia*.

- Le terme de « coliformes fécaux » ou de « coliformes-tolérants » correspond à des coliformes qui présentent les mêmes propriétés (caractéristiques de coliformes) après incubation à la température de 44 C°. Le groupe des coliformes fécaux comprend les espèces suivantes : *Citrobacter freundii*, *Citrobacter diversus*, *Citrobacter amalonaticus*, *Enterobacter aerogenes*, *Enterobacter cloacae*, *Echerichia coli*, *Klebsiella pneumonia*, *Klebsiella oxytoca*, *Moellerella wisconsensis*, *Salmonella* (sous genre III Arizona), *Yersinia enterocolitica*.
- Le terme « *E. coli* présumé » correspond à des coliformes thermotolérants qui produisent de l'indole à partir de tryptophane, à 44 C°.
- Le terme « *E. coli* » correspond à des coliformes thermotolérants qui produisent de l'indole à partir du tryptophane et ont les caractères biochimiques propres à cette espèce. (RODIER, 2005)

1.1.3.4.2. Les streptocoques fécaux et *Enterococcus*

Sous la dénomination générale de « streptocoques fécaux », il faut entendre l'ensemble des streptocoques possédant la substance (acide teichoïque) antigénique caractéristique du groupe D de Lancefield, c'est-à-dire essentiellement : *Enterococcus faecalis*, *E. faecium*, *E. durans*, *E. hirae*, *Streptococcus bovis*, *S. suis* et *S. equinus*. Ces

streptocoques du groupe D sont généralement pris globalement en compte comme des témoins de pollution fécale, car tous ont un habitat fécal.

Toutefois, d'une façon générale, les concentrations en streptocoques fécaux sont, dans les milieux naturels autres que ceux spécifiquement pollués par le bétail, inférieures à celles des coliformes fécaux. Il faudra tenir compte de cette différence des concentrations (que l'on peut évaluer à un rapport de 1 à 2 ou 4) dans le choix des prise d'essai.(RODIER ;2005).

Le genre *Streptococcus* est vaste et divers, de sorte qu'il est difficile de classer ces bactéries de façon satisfaisante. Les 29 espèces du genre *Streptococcus* sont subdivisées en 5 groupes principaux :

- Les streptocoques pyogènes hémolytiques ;
- Les streptocoques oraux ;
- Les entérocoques ;
- Les streptocoques lactiques.

L'application à ces bactéries des techniques de biologie moléculaire a donné un nouveau système de classification. Le genre unique original est maintenant séparé en 3 genres différents :

- *Streptococcus* : comprend la plupart des espèces pathogènes pour l'homme ;
- *Enterococcus* : correspond au précédent groupe des enterocoques ;
- *Lactococcus* : correspond aux streptocoques lactiques.

La norme ISO 7899-2 donne la définition suivante :

« Microorganismes se développant à 37 C° sur un milieu de Salnetz et Bartley, donnant une réaction positive à 44 C° sur une gélose biliée à l'esculine et qui, de plus, donnent une réaction négative dans l'essai à la catalase ».

Dans la norme française NF EN 7899-2 les enterocoques sont définis comme

« Bactéries Gram positif, sphériques à ovoïdes, formant des chaînettes, non sporulées, catalase négative, possédant l'antigène de groupe D, cultivant en anaérobiose à 44C°, et à pH 9,6 et capables d'hydrolyser l'esculine en présence de 40% de bile ». (REJSEK ;2002).

1.1.3.4.3. Les bactéries sulfito-réductrices

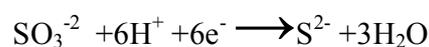
Les *Clostridium* sulfito-réducteurs sont souvent considérés comme des témoins de pollution fécale. La forme spore, beaucoup plus résistante que les formes végétatives des coliformes fécaux et des streptocoque fécaux, permettrait ainsi de déceler une pollution fécale ancienne ou intermittente.

Sans débattre de l'intérêt réel d'une telle indication concernant la date de pollution, il faut cependant considérer que si les *Clostridium* sulfito-réducteurs peuvent certes être des germes fécaux, ce sont également des germes telluriques et que, de ce fait, aucune spécificité d'origine fécale ne peut être attribuée à leur mise en évidence.

Dans une telle optique d'interprétation, il y a intérêt à ne rechercher que les espèces les plus susceptibles d'être d'origine fécale : c'est le cas en particulier de *Clostridium perfringens*. (RODIETR, 2005).

Selon REJSEK (2002), les spores des bactéries anaérobies sulfitoréductrices et celles de *Clostridium perfringens* peuvent être intéressantes en tant qu'indicateurs de traitement. Ainsi, elles peuvent montrer l'efficacité d'un traitement de filtration, où elles se comportent comme des kystes de parasites, aussi bien au niveau d'une station de traitement qu'au niveau du sol : signe d'efficacité de la filtration naturelle. De plus, *Clostridium perfringens*, sous sa forme sporulée, est très résistant à la chloration et va donc se comporter comme les microorganismes plus difficiles à mettre en évidence.

Donc la nomenclature sulfitoréducteurs est attribuée à ces germes car ils ont comme point commun de réduire le sulfite de sodium en sulfure selon la réaction suivante :



1.2. Epuration des eaux usées

La filière de l'épuration des eaux usées recommande différentes techniques à divers niveaux technologiques souvent très élaborées ceci est illustré comme étant des méthodes classiques de traitement ; ainsi que de nouvelles techniques visant la protection de l'environnement et la sauvegarde du milieu naturel ont apparus celle-ci est démontré sous le vocable de lagunage ou phytoépuration.

1.2.1. Les méthodes classiques de traitements

La ligne de traitement complète des eaux résiduaires peut être schématiquement scindée en deux filières :

- La filière eau dans laquelle l'eau est débarrassée de tous les polluants avant son rejet dans le milieu naturel ;
- La filière boue dans laquelle les résidus générés par la filière eau sont traités et déshydratés avant leur évacuation.

La filière eau comprend généralement :

- Un prétraitement pour l'élimination des objets de taille comprise entre 0,1 et 50 mm (dégrillage, tamisage), des graisses et du sable,
- Un traitement primaire pour l'élimination des matières en suspension facilement décantables,
- Un traitement secondaire composé d'un réacteur biologique pour l'élimination de la pollution biodégradable organique (DBO_5) ou minérale (NH_3 , NO_3^- , P).
- Certaines stations sont également équipées d'un traitement tertiaire pour l'élimination des microorganismes ou du phosphore résiduel.

Les boues provenant du décanteur primaire (boues primaires) et du traitement biologique (boues biologiques) seront ensuite traitées et conditionnées sur la filière boues. (GROSCLAUDE, 1999).

1.2.1.1. Les prétraitements

La première étape du traitement consiste à débarrasser les effluents de tout élément susceptible de gêner le fonctionnement des ouvrages. (GROSCLAUDE, 1999).

Ils permettent d'éliminer les matières les plus grossières, susceptibles d'endommager les organes mécaniques ou de perturber l'efficacité des étapes ultérieures.

Ils font appel :

- A des procédés mécaniques, comme des grilles ou des tamis, pour éliminer des grosses particules transportées par les eaux ; (REJSEK, 2002).

Les gros déchets sont tout d'abord éliminés par un dégrilleur constitué de barreaux espacés de 10 à 50 mm suivi d'un dégrilleur plus fin (3 à 10 mm) ou d'un tamisage (0,1 à 3mm). (GROSCLAUDE ; 1999).

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

Le prétraitement se poursuit par l'élimination des particules denses ou abrasives ; cette étape est souvent couplée avec l'élimination des flottants, et en particulier des graisses, dans un ouvrage appelé dégraisseur/dessableur. (GROSCLAUDE, 1999). La pollution présente dans les eaux résiduaires, une fois prétraitées, se compose d'une fraction de fines particules (les MES) qui n'ont pas été arrêtées par le dégrillage ou le tamisage et des molécules organiques et minérales en solution vraie ou colloïdale.

En règle générale, l'élimination des MES est obtenue par décantation gravitaire alors que celle de la pollution soluble subit une dégradation biologique, mais pour certaines stations d'épuration, l'élimination des MES est réalisée dans l'ouvrage du traitement biologique. (GROSCLAUDE ; 1999).

1.2.1.2. Le traitement primaire

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

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

L'élimination des MES peut également être réalisée par flottation naturelle (particule naturellement plus légère que l'eau) ou provoquée (l'injection de microbilles d'air qui se fixent sur les particules réduit leur densité apparente). Ce procédé appelé flottation est principalement utilisé dans le traitement des eaux résiduaires industrielles (élimination des MES sur les effluents hautement fermentescibles, ex : agroalimentaire), pour l'élimination des graisses au niveau du prétraitement, ou encore pour la concentration des boues biologiques. (GROSCLAUDE, 1999).

1.2.1.3. Le traitement secondaire

L'élimination des matières organiques implique le recours à des traitements biologiques qui font intervenir des organismes vivants, essentiellement des bactéries. (REJSEK, 2002). Ces traitements sont basés sur la capacité des micro-organismes à oxyder la matière minérale (NH_3 ...) et les matières constitutives de la DCO et de la DBO d'une part (aérobie), et à réduire d'autre part les molécules comportant de l'oxygène (NO_3 (anoxie), SO_4 et CO_2 (anaérobie). Ils vont permettre ainsi d'éliminer la pollution soluble biodégradable et une partie des MES. (GROSCLAUDE, 1999).

1.2.1.3.1. L'élimination de l'ammoniaque : la nitrification

Contrairement à la matière organique, l'élimination de l'ammoniaque n'est possible qu'en présence d'oxygène. La réaction d'oxydation n'est réalisée que par un nombre très limité d'espèces bactériennes strictement aérobies, les bactéries nitrifiantes. L'oxydation de l'ammoniac en nitrates s'effectue en deux étapes :

- NH_3 est d'abord converti en nitrite (NO_2^-) par des bactéries du genre *Nitrosomonas*.
- Les nitrites sont ensuite oxydées en nitrates (NO_3^-) par des bactéries du genre *Nitrobacter*. (GROSCLAUDE ;1999)

1.2.1.3.2. L'élimination des nitrates : la dénitrification

Dans le cas de l'élimination biologique des nitrates, la dénitrification, la réaction nécessite l'oxydation concomitante d'une molécule organique ou minérale qui fournira l'énergie nécessaire à la réduction des nitrates en azote N_2 . (GROSCLAUDE, 1999)

On trouve deux groupes de procédés :

- Les procédés à culture fixée où la biomasse épuratrice est fixée sur des supports. L'eau à traiter coule au contact de ces supports. Les micro-organismes fixent donc la pollution organique et la dégradent (biofiltration par exemple) ;
- Les procédés à culture libre où la biomasse est en suspension dans l'eau à traiter. Les microorganismes fixent la pollution et se développent sous forme de floccs biologiques que l'on peut séparer de l'eau traitée par décantation (boues activées par exemple). (REJSEK ;2002).

1.2.1.4. Le traitement tertiaire :

Ces traitements visent principalement l'élimination du phosphore (la déphosphatation) et les germes pathogène (la désinfection).

1.2.1.4.1. La déphosphatation

L'élimination du phosphore concerne les traitement de déphosphatation, soit physico-chimique soit biologique. La déphosphatation biologique, de développement récent, est basée sur la succession de phases anaérobies et aérobies au cours du traitement biologique mais son rendement est en générale moins bon que celui de la déphosphatation physico-chimique. (REJSEK, 2002).

La déphosphatation peut aussi être réalisée par précipitation physico-chimique en présence de sels minéraux comme le sulfate d'ammonium ou le chlorure ferrique et s'effectuer soit simultanément aux réactions biologiques dans le bassin de boues activées, soit en traitement final.(GROSCLAUDE, 1999).

1.2.1.4.2. La désinfection

La désinfection vise à réduire la concentration des germes pathogènes dans les effluents avant rejet dans l'environnement. Contrairement aux normes de désinfection pour la production d'eau potable qui spécifie l'absence totale de coliformes, les normes de rejets pour les eaux résiduaires urbaines ERU varient suivant la nature du milieu récepteur. On peut distinguer deux catégories de traitement :

- Les procédés extensifs comme le lagunage et l'infiltration-percolation (filtration à travers un massif filtrant). Dans le cas du lagunage, il ne subsistera qu'une bactérie pour 1000 ou 10 000 présentes dans l'eau résiduaire alors que dans le second cas il n'en subsistera qu'une pour 100 ou 1000.
- Les procédés physico-chimiques intensifs comme la désinfection par le chlore, l'acide péracétique, les UV, l'ozone ou la filtration sur membranes d'ultra ou de micro-filtration. L'efficacité de ces procédés dépendra des doses utilisées (abattement de 4 à 6 logarithme), quant à la filtration sur membrane d'UF, elle permet une désinfection totale. (GROSCLAUDE, 1999).

1.2.1.5. Le traitement des boues

Les traitements biologiques ou physico-chimiques utilisés pour l'épuration des eaux résiduaires génèrent une production importante de boues diluées (> 99% d'eau) et contenant de la matière organique fermentescible. Les deux principaux objectifs de la filière de traitement des boues seront donc :

- De stabiliser les matières organiques pour éviter toute fermentation incontrôlée qui entraînerait des nuisances olfactives,
- D'éliminer un maximum d'eau afin de diminuer les volumes de boues à évacuer.

Après une étape préalable d'épaississement permettant de concentrer les boues, la stabilisation de la matière organique est réalisée grâce à des procédés biologiques ou physico-chimiques. L'étape finale de déshydratation permettra d'extraire le maximum d'eau. (GROSCLAUDE, 1999).

1.2.1.5.1. Epaississement des boues

Les boues, avant leur élimination, subissent un traitement adapté à leur nature ainsi qu'à leur destination, afin :

- D'en réduire le volume, en éliminant l'eau (les boues sont, en effet, extraites liquide du système de traitement de l'eau). Ceci est réalisé par un procédé d'épaississement qui est une concentration de la boue par décantation puis par un procédé de déshydratation permettant d'éliminer une quantité d'eau liée aux MES plus importante, par filtre presse ou centrifugation ; (REJSERK, 2002) ;

Les matières organiques présentes dans les boues leur confèrent un caractère fermentescible qui se traduit lors de leur stockage par l'émission de nombreuses molécules odorantes (H_2S , mercaptan.....). Cette activité biologique indésirable peut être maîtrisée soit en la contrôlant dans un réacteur adéquat soit en augmentant le pH par une addition de chaux. Deux familles de procédés biologiques peuvent être utilisées : la digestion anaérobie ou la stabilisation aérobie thermophile. (GROSCLAUDE ;1999).

1.2.1.5.2 La déshydratation

Après la phase d'épaississement qui a permis d'éliminer 60 à 85% d'eau et la phase de stabilisation, le traitement des boues est complété par une déshydratation qui a pour but d'éliminer le maximum de l'eau résiduelle. Deux catégories de procédés sont généralement utilisés : les procédés mécaniques et les procédés thermiques.

Pendant la phase de séchage, les boues présentent un comportement plastique et collant pour des taux de matière sèche d'environ 50% ce qui implique certains aménagements des techniques et des matériels.

Les buées, très chargées en vapeur d'eau, comportent une fraction d'incondensables malodorants devant être détruites par combustion (850 c°) soit directement dans le générateur thermique, soit dans un incinérateur spécifique. (GROSCLAUDE ;1999).

1.2.1.5.3 Incinération des boues

Donc le problème des boues se pose en terme d'évacuation ; trois solutions sont possibles :

- La mise en décharge de boues stabilisées et déshydratées mais n'est plus réalisable à partir de 2002 ;
- La valorisation agricole par épandage sur des sols agricoles où elles vont jouer un rôle d'engrais. Elles sont utilisées sous forme liquide, solide ou sous forme de composte, mais toujours stabilisées ;
- L'incinération qui présente un intérêt pour les boues autocombustible, c'est-à-dire fraîches et déshydratées. (REJSEK ;2002).

Quelle que soit la technique d'incinération, les fumées doivent être traitées avant rejet dans l'atmosphère. Ce traitement est d'autant plus complexe que la charge en poussière des fumées est élevée. Réalisé en plusieurs étapes, le traitement des fumées peut nécessiter un pré-cyclonage, un dépoussiérage électrostatique, un lavage, voir éventuellement une oxydation catalytique. (GROSCLAUDE, 1999).

1.2.2. Traitement par lagunage ou la phytoépuration

L'épuration par lagunage consiste à faire passer les effluents des eaux usées brutes ou prétraitées dans un bassin naturel, ce qui permet de stimuler en amplifiant l'action auto-épuratrice des étangs ou des lacs. La pollution est alors dégradée par l'activité bactérienne, l'activité photosynthétique et l'assimilation des substances minérales. Il permet une épuration à charges organique élevées, une bonne élimination de l'azote et du phosphore, ainsi qu'une faible production de boues en excès, mais nécessite des superficies importantes et un contrôle d'exploitation rigoureux.(ROQUES ; 1983)

1.2.2.1. Le principe général de lagunage

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

Tous les lagunages appliquent le principe suivant : après une première décantation, les eaux usées traversent des bassins de lagunage plantés ou non. L'épuration s'effectue par les plantes et par les micro-organismes fixés sur leurs racines et sur des substrats (graviers, sable...), grâce à l'effet filtrant du sol. Dans certains types de lagunes, les conditions aérobies et anaérobies se succèdent ou co-existent, ce qui permet d'obtenir un bon rendement d'épuration des nutriments (azote et phosphore).

1.2.2.2 Les différents systèmes de lagunage

1.2.2.2.1. Le lagunage à microphytes (lagunage naturel)

Un lagunage naturel est un procédé de traitement biologique des eaux usées se faisant dans des bassins où est maintenue une tranche d'eau de 0,8 à 1,5 m. Les microphytes qui sont des algues, les petits animaux (protozoaires, rotifères, crustacés) et les bactéries en présence d'oxygène, vont transformer les charges polluantes et stabiliser les boues. Les bactéries anaérobies jouent le même rôle dans les sédiments). (MOREL et KANE, 1998)

Le fonctionnement de ce système repose sur l'action combinée des algues unicellulaires et des bactéries. Grâce au rayonnement lumineux, les algues produisent de l'oxygène qui permet la respiration et le développement des colonies bactériennes. Les bactéries – ainsi que certains champignons microscopiques – dégradent la matière organique en azote ammoniacal. Celui-ci, dans un milieu bien oxygéné, se transforme en nitrates assimilables par les algues, tout comme les phosphates qui proviennent en majeure partie des eaux de lessives. Les algues se multiplient alors dans le milieu et ainsi de suite.

1.2.2.2.2. Le lagunage à macrophytes (phytoépuration)

Dans ce système, l'eau est apparente : 30-40 cm d'eau au-dessus d'un substrat composé le plus souvent de graviers ou de sable dans lequel sont repiqués les végétaux aquatiques. Ce système nécessite une superficie suffisamment grande : 10-12 m² par usager. Les eaux usées séjournent simplement dans une série de bassins à ciel ouvert peuplés de végétaux aquatiques. Le roseau (ou phragmite) et autres plantes vigoureuses ont été largement utilisés à cet effet sous le nom de «macrophytes ». Ces dernières consomment les composés polluants dissous dans l'eau – azote et phosphore – qui constituent pour eux des éléments nutritifs. Par ailleurs elles servent de supports à de nombreux organismes microscopiques – algues et bactéries – qui font le gros du travail. (CHAÏB, 2002)

Les végétaux fixent les colonies de bactéries sur la base de leurs tiges et leurs rhizomes (tiges souterraines), ce qui améliore les performances des organismes épurateurs. Par ailleurs, ils absorbent par leurs racines une partie (10 % environ) des sels minéraux – nitrates et phosphates – issus de la décomposition de la matière organique présente dans les eaux usées.

1.2.2.2.2. Le bassin de finition à hydrophytes

Ce système comprend deux phases :

- une décantation-digestion anaérobie ;
- un lagunage à macrophytes.

a. Décanteur-digesteur

Les eaux usées sont dirigées dans une simple fosse étanche dite décanteur-digesteur. Les matières solides non liquéfiables remontent à la surface et forment une croûte flottante qui au boue d'une quinzaine de jours est suffisamment importante pour empêcher l'introduction de l'oxygène de l'air et la propagation des mauvaises odeurs ; il est possible d'activer la formation de cette croûte en mettant à la surface de l'eau, de la paille, des brindilles ou de copeaux de bois. Les gaz malodorants (H_2S) sont oxydés par des bactéries lorsqu'ils diffusent à travers la croûte. Les plantations d'espèces semi-aquatiques améliorent encore la désodorisation et rend l'ensemble plus esthétique. Les matières piégées sous la croûte se liquéfient progressivement et sont entraînées par le courant liquide. La digestion anaérobie des matières organiques est amorcée avec une production limitée de bio-gaz.(MOREL et KANE, 1998)

b. Lagunage à macrophytes

Les eaux passent ensuite dans des bassins de lagunage couvert de plantes aquatiques flottantes. Le traitement devient aérobie dans la rhyzosphère (autour des plantes) et continue à dégrader la matière organique ; les décomposeurs anaérobies du fond produisent des bulles de biogaz qui adhèrent aux particules organiques en suspension dans l'eau, les allègent et les font remonter à la surface où elles sont piégées dans les racines des plantes.

Les plantes libèrent suffisamment d'oxygène par leur racines, leurs feuilles et le en contact avec l'eau et les stolons pour que vivent dans leur entourage des bactéries aérobies et des invertébrés qui se nourrissent de la boue organique pour la transformer en sels minéraux. Ces sels minéraux servent au développement des plantes. (MOREL et KANE ;1998).

Le séjour prolongé de l'eau au contact des hydrophytes permet une absorption importante de sels minéraux, ce qui évite l'eutrophisation du milieu naturel récepteur. L'oxygène émis par les plantes favorise l'oxydation des ions ammonium résiduels. Là où il n'existe pas d'exutoires satisfaisants, les eaux du bassin de finition peuvent être épandues de façon diffuse dans un système boisé qui servira de piège pour les nitrates résiduels.

1.3. Conclusion

Les eaux usées de différentes compositions et de diverses origines constituent un problème pour la nature lors du rejet sans subir de traitements au préalable. Afin de montrer l'intérêt de leur épuration, nous avons présenté dans ce chapitre d'une part, les origines et caractéristiques des eaux usées, et d'autre part, les différentes méthodes utilisées pour leur épuration. L'intérêt consiste à trouver la méthode la moins coûteuse et celle qui présente une basse nuisance auditive et olfactive, ce qui est le cas des méthodes quasi-nature tel que la phytoépuration.

2.1. Introduction

Actuellement, une attention considérable est donnée en Europe et en Amérique à l'épuration par filtres plantés à macrophytes (Phytoépuration) pour traiter les eaux usées urbaines et industrielles. La phytoépuration veut dire l'action de l'épuration des eaux usées en présence de plantes. Elle peut être réalisée à travers différents systèmes, caractérisés par le fait que l'eau vient couler lentement et sous conditions contrôlées à l'intérieur de milieux végétales, de façon à en favoriser la dépurature naturelle, qui s'effectue à cause du processus d'aération, sédimentation, absorption et métabolisation de la part des microorganismes et de la flore. Les systèmes de phytoépuration sont utilisés pour la dépurature d'eaux de différentes provenances et avec caractéristiques différentes Borin (2003). Cette technique présente quelques avantages relativement aux systèmes classiques d'épuration :

- fonctionne à faible frais d'exploitation ;
- peu de dépense d'énergie pour son fonctionnement;
- simple maintenance ;
- ne nécessite pas un personnel qualifié pour sa gestion.

La phytoépuration est avantageuse surtout pour les petites communes à population dispersée et pour les pays en voie de développement. (BRIX, 1986).

2.2. Historique de la phytoépuration

Durant les deux dernières décennies les multiples fonctions et valeurs des marais ont été reconnus non seulement par les scientifiques et les sociétés exploitantes, mais aussi par le public. La capacité des marais de transformation et de stockage des matières organiques et des nutriments polluants permettant leur utilisation dans l'amélioration de la qualité des eaux usées, ce qui n'est pas une invention nouvelle ; en effet depuis longtemps l'homme évacuait les eaux usées et les marais naturels ont été plus ou moins impliqués dans l'épuration de ces eaux. L'assainissement des eaux usées est souvent orienté, directement ou indirectement, dans la nature.

La technologie de traitement des eaux usées en utilisant des plantes est apparue en Europe d'Ouest basée sur une recherche de SEIDEL qui a commencé durant les années soixante (1960's), et par KICKUTH à la fin des années soixante-dix (1970's) et dernièrement durant les années quatre-vingt (1980's). Des travaux avancés ont commencé aux Etats Unies au début des années quatre-vingt (1980's) avec la recherche de WOLVERTON et GERBERGET et al..

En 1955, SEIDEL discuta dans un rapport la possibilité « de diminuer la surfertilisation, la pollution et l'envasement des eaux des terres intérieures à travers des plantes particulières permettant les eaux polluées de devenir capables de supporter la vie de nouveau ». L'auteur a proposé pour ce but le jonc commun « *Schoenoplectus lacustris* », ayant observé dans sa recherche que cette espèce est capable de retenir de grande quantité de substances organiques des eaux contaminées.

Dans des expériences supplémentaires durant les années cinquante 50's, SEIDEL a montré que *Schoenoplectus* améliore et enrichit le sol sur lequel il se développe, en bactérie et humus et ceci apparemment exsude les antibiotiques. Un rang de bactéries (Coliformes, Salmonella et Enterococci) évidemment disparaissent des eaux polluées en passant à travers une végétation de joncs (BRIX, 1997).

Le système développé par SEIDEL comprend des séries de lits composés de sable ou gravier supportant une végétation aquatique immergée tel que la massette, le jonc, et le phragmite qui a été le plus communément utilisé, et dans la majorité des cas le plan d'écoulement été vertical. (SHERWOOD, 1993).

Dans le nord d'Amérique, des observations de la capacité assimilative des terres émergées naturellement mène à l'expérimentation avec différents modèles de marécages construits durant les années soixante-dix 70's.

KICKUTH proposa l'utilisation de sols cohésifs au lieu du sable ou du gravier, la végétation préférée a été le *Phragmites* et le système d'écoulement a été horizontal. (SHERWOOD, 1993).

Commençant en 1985, un nombre de systèmes de « lits de phragmites » a été construit en Angleterre basés sur les concepts de KICKUTH, mais plusieurs cas utilisaient le gravier au lieu des sols cohésifs dus à la conductivité hydraulique élevée (SHERWOOD, 1993).

Un prélèvement effectif de la DBO₅, d'azote, du phosphore et des composés organiques a été déclaré dans les recherches de KICKUTH. Comme résultat, en 1990 ; près de 500 systèmes de lits de phragmites ont été construits en Allemagne, Danemark, Australie et en Suisse. Les systèmes fonctionnelles comprennent des unités pour famille individuelle sur site et des systèmes plus larges traitant des eaux usées ménagères et industrielles. (SHERWOOD, 1993).

Les travaux de WOLVERTON en Louisiana ont commencé avec des gammes de plateaux (sur banc dans une serre) contenant du gravier et une végétation aquatique. En 1991, il y avait près de 60 systèmes fonctionnant ou en réalisation au sud central des Etats Unies. (SHERWOOD, 1993).

Les travaux de GERSBERG ont été conduites sur plusieurs années, et ont concernés la profondeur de pénétration d'une variété de plantes (*Typha*, *Scirpus*, *Phragmites*). (SHERWOOD, 1993).

En 1991 il y avait probablement au moins 80 systèmes en fonction dans plusieurs Etats, basés sur les critères et l'assistance du TVA. (SHERWOOD, 1993).

Selon POULET et al (2004), la technologie des filtres plantés de macrophytes pour le traitement des eaux usées domestiques est une technique au développement récent. Apparue en France dans les années quatre-vingt 80's, cette technique de traitement a vu son développement s'accroître depuis 1997. La forte demande actuelle pour ce type de station d'épuration de la part des élus est réelle. Il s'agit d'une technologie fiable, simple d'exploitation, facilitant grandement la gestion des boues d'épuration et qui, de surcroît, est bien acceptée par les habitants en raison de sa bonne aptitude à l'intégration paysagère. Ainsi, elle s'avère fortement recommandée pour les petites collectivités et les pays à faibles ressources financières.

2.3. Généralités sur les systèmes de phytoépuration

2.3.1. Qu'est-ce qu'un marais naturel ?

Le marais est défini comme une terre où la surface d'eau est assez proche du sol pour maintenir chaque année des conditions saturées du sol, ainsi qu'une végétation liée. (SHERWOOD, 1993).

Le marais est un espace transitionnel entre terre et eau. Les limites entre le marais, la terre ou l'eau souterraine ne sont pas donc toujours distinctes. Le terme marais « wetland » englobe un large rang de milieux humides comprenant les marécages, les prairies immergées humides et les bandes humides le long des cours d'eaux (DUPOLDT et al; 1995).

Selon « The Clean Water Act » du gouvernement des Etats Unis, les marais sont définies comme « des surfaces submergées ou saturées par l'eau de surface ou souterraine à une fréquence et une durée suffisante pour supporter, sous des circonstances normales, une végétation répandue, typiquement adaptée à la vie dans des conditions de sol saturé » (MITSCH et GOOSELINK, 1993 in BRIX, 1997).

2.3.2. Les biocénoses des marais

Les organismes constituant les communautés limniques peuvent être rassemblés, de façon générale, en un ensemble de groupes distincts selon leur fonction écologique (producteurs, consommateurs, décomposeurs), leur forme de vie ou leur habitat. (RAMADE, 2003)

➤ Les phytocénoses des marais

Les producteurs primaires sont représentés par des végétaux supérieurs macrophytes ainsi que des algues filamenteuses et par du plancton. Les macrophytes appartiennent à diverses familles, cependant les graminées (roseaux), Juncacées, Cypéracées dominent dans ces phytocénoses de la zone littorale de même que diverses Dicotylédones. Les premiers sont inféodés à la zone littorale, de faible profondeur car il

est nécessaire, en règle générale, aux phanérogames aquatiques de s'enraciner dans les vases du fond.

Les macrophytes sont représentées par des végétaux amphibies appartenant à diverses familles situées en bordure du biotope aquatique. Près de la rive existe une ceinture de végétation constituée par des joncs, des roseaux et autres plantes amphibies dénommées hélrophytes. Quand on s'éloigne un peu plus des rives croissent aussi des hydrophytes, plantes entièrement aquatiques constituant la végétation flottante et (ou) fixée. La plupart sont des rhizophytes, enracinés dans les vases benthiques (*Potamogeton*, *Myriophyllum*, renoncules aquatiques, nénuphars, etc.). Certaines d'entre elles, que l'on dénomme pleustophytes, flottent librement à la surface de l'eau cas des Lemnacées (lentilles d'eau). Beaucoup de ces dernières correspondent à des espèces tropicales telles les jacinthes d'eau par exemple. (RAMADE, 2003)

Selon le même auteur, la production primaire de la zone limnétique est assurée par le phytoplancton et des algues filamenteuses. Dans les écosystèmes limniques, les Diatomées et les Chlorophycées représentent les groupes dominants du phytoplancton dans lequel s'observent aussi des Chrysophycées, des péridiniens et autres phytoflagellés. On désigne sous le terme général de nanoplancton les plus petits organismes phytoplanctoniques qui ne peuvent être collectés avec des filets.

Les algues filamenteuses, également très abondantes tant dans la zone riparienne que limnétique, sont représentées par des Chlorophycées (spirogyres, *Odeogonium*, *Zygnema*) et des Cyanophycées. Le périphyton est constitué par une communauté d'organismes autotrophes et hétérotrophes (algues microscopiques, bactéries, protozoaires, Rotifères, hydres et autres invertébrés) qui se développent à la surface des tiges et des feuilles de végétaux immergés, le périlithon désignant, lui, les communautés adhérant à la surface des roches et autres matériaux minéraux constituant le substrat des biotopes aquatiques concernés.

➤ Les zoocoenoses des marais

Les *consommateurs* des biocoenoses appartiennent à trois groupes distincts : le zooplancton, le necton, et le neuston. Le zooplancton des eaux douces et surtout constitué

par des micro- crustacés (Cladocères, Copépodes, Ostracodes) et par des Rotifères. Le necton, qui correspond à des animaux capables de se déplacer activement en milieu aquatique, est représenté par les insectes, les amphibiens et les poissons. Le terme de neuston désigne les animaux qui se reposent ou nagent à la surface de l'eau (coléoptères *Grinidae*, hétéroptères *Gerridae*, par exemple). (RAMADE, 2003)

Le benthos constitue une communauté particulière où s'observent de nombreux organismes saprophages, ainsi que des microphages et des prédateurs. Les Annélides Oligochètes Tubificides et les larves de Diptères Chironomides en représentent les groupes dominants auxquels s'ajoutent de nombreux protozoaires, Nématodes, des larves d'Odonates, des mollusques *Spheriidae*, des Gastéropodes pulmonés, etc. (RAMADE, 2003)

Selon le même auteur, outre divers groupes d'invertébrés pourvus d'une mobilité importante le necton est surtout constitué par le peuplement de poissons. En milieu lentique tempéré, les principales familles sont constituées par les *Cyprinidae*, les *Percidae* et les *Salmonidae* constituant les peuplements piscicoles. Parmi ces derniers, des genres tels les corégones ou les ombles (*Salvellinus* sp.) sont inféodés aux biotopes lacustres. Dans les lacs tropicaux une autre famille celle des *Cichlidae* constitue le groupe dominant de ces peuplements.

2.4. Les marais artificiels

La technique d'épuration des eaux usées par les plantes ou phytoépuration a pris plusieurs dénominations tels que : le lagunage, les marécages ou marais construits, le phytofiltre, la technique des zones humides, les lits filtrants, ...etc. Les marais construits pour le traitement d'eau sont des systèmes complexes intégrant de l'eau, des plantes, des animaux, des microorganismes et le milieu qui les entoure. (DUPOLDT et al; 1995).

Un marécage construit est défini comme un marais construit spécifiquement pour le contrôle de pollution et l'aménagement des déchets, à un emplacement autre que celui d'un marais naturel déjà existant (SHERWOOD, 1993).

D'après LECOMTE (1998), la méthode des « zones humides » est une technique utilisée pour les eaux usées ou pour les eaux de mines, qu'il s'agisse d'eau d'exhaure ou d'eau de drainage de zone de dépôts de déchets miniers (terrils, lagune....).

Selon le même auteur, ce type de traitement utilisé pour la régénération d'effluents urbains est appelé technique de lagunage et a été essayé également pour les rejets d'usine de traitement des bois.

D'apparence simple, le fonctionnement des lits filtrants plantés de macrophytes fait intervenir des réactions épuratoires pouvant être complexes. Mais le principe de base reste l'infiltration d'un effluent brute à travers des lits composés d'un mélange sable-gravier ou de sol en place, plantés de macrophytes (le plus souvent, des roseaux communs). Le matériau du lit et la partie racinaire des plantes servent de support à une biomasse épuratrice. On peut ainsi considérer ces stations comme des marais artificiels. (POULET et al, 2004)

2.4.1 Les composantes d'un marais artificiel

Un marais construit est constitué par un bassin désigné proprement pour contenir de l'eau, un substrat, et souvent, des plantes vasculaires. D'autres composantes importantes des marais, tels que les communautés microbiennes et les invertébrés se développeront naturellement :

2.4.1.1. L'eau

Les marais se forment quand l'eau est dirigée vers une dépression profonde et où une couche superficielle imperméable empêche l'eau de s'infiltrer dans le sol. Ces conditions peuvent être créées pour construire un marais. Un marais peut être construit presque n'importe où dans le paysage en formant la surface du sol afin de collecter l'eau en scellant le bassin pour retenir l'eau.

L'hydrologie est le facteur le plus important dans la conception d'un marais construit car il lie tous les fonctions dans le marais et car il est souvent le facteur primaire du succès ou l'échec d'un marais construit. L'hydrologie d'un marais construit n'est pas

très différente de celle des surfaces d'eau, bien qu'elle diffère en quelques aspects importants :

- De petits changements dans l'hydrologie peuvent avoir des effets assez significatifs sur un marais et l'efficacité de son traitement ;
- A cause de sa large superficie et sa petite profondeur, un système de marais communique vigoureusement avec l'atmosphère à travers la pluie et l'évapotranspiration (la perte combinée de l'eau par l'évaporation de la surface d'eau et la perte à travers la transpiration par les plantes) ;
- La densité de la végétation d'un marais influence vigoureusement son hydrologie, premièrement, en gênant les voies d'écoulement, quand l'eau parcourt son chemin sinueux à travers le réseau des tiges, des feuilles, des racines et rhizomes et, deuxièmement, en bloquant l'exposition au vent et au soleil. (DUPOLDT et al; 1995).

2.4.1.2. Le substrat, sédiments, et détrit

Les substrats utilisés pour construire un marais comprennent le sol, le sable, le gravier, les pierres et des matériaux organiques comme le compost. Les sédiments, et les détrit s'accumulent dans le filtre à cause des vitesses basses d'eau et la haute productivité typique des marais. Les substrats, les sédiments, et le détrit sont importants pour plusieurs raisons :

- Ils supportent beaucoup d'organismes vivant dans le marais ;
- La perméabilité du substrat influence le mouvement d'eau à travers le marais ;
- Plusieurs transformations biologiques (spécialement microbiennes) ont lieu dans le substrat ;
- Les substrats fournissent un stockage pour plusieurs contaminants ;
- L'accumulation du détrit augmente la quantité de la matière organique dans le marais. La matière organique fournit des sites pour l'échange de matériaux

et l'attachement microbien, c'est une source de carbone ; la source d'énergie qui règle certaines réactions biologiques importantes dans le marais.

Les caractéristiques physiques et chimiques des sols et autres substrats sont altérées quand ils sont submergés. Dans un substrat saturé, l'eau remplace les gaz atmosphériques dans les espaces des pores et le métabolisme microbien consomme l'oxygène disponible. Dès que l'oxygène est consommé il peut être remplacé plus rapidement par diffusion à partir de l'atmosphère, les substrats deviennent anoxiques (sans oxygène). Ce milieu réducteur est important dans le prélèvement des polluants tels que l'azote et les métaux. (DUPOLDT et al; 1995).

2.4.1.3. La végétation

Toutes deux, les plantes vasculaires (les hautes plantes) et les plantes non vasculaires (algues) sont importantes dans les marais construits. La photosynthèse par les algues augmente le contenu d'oxygène dissous dans l'eau qui à son tour affecte les réactions des nutriments et des métaux. Les plantes vasculaires contribuent au traitement des eaux résiduaires et des eaux de ruissellement en différentes manières :

- Elles stabilisent les substrats et limite l'écoulement ;
- Elles ralentissent la vitesse de l'eau, permettant aux matières suspendues de se déposer ;
- Elles prélèvent le carbone, les nutriments, et les éléments traces et les incorporent dans les tissus des plantes ;
- Elles transfèrent les gaz entre l'atmosphère et les sédiments ;
- La fuite d'oxygène des surfaces supérieures des structures de la plante crée des macrosites oxygénés dans le substrat ;
- Les systèmes racinaires et leurs tiges fournissent des sites pour l'attachement microbien ;
- Elles créent le détritus quand elles meurent et pourrissent.

Les marais construits sont souvent plantés par une végétation immergée, qui se développe avec leurs racines dans le substrat et leur tiges et feuilles apparaissent sur la surface d'eau. Les plantes émergentes communes utilisées dans les lits filtrants comprennent : les joncs, les massettes, les roseaux et un nombre d'espèces de feuilles larges. (DUPOLDT et al; 1995).

2.4.1.4. Les microorganismes

Les microorganismes comprennent les bactéries, les levures, les champignons, les protozoaires, les algues des écorces. La biomasse microbienne est un évier majeur du carbone organique et plusieurs nutriments. L'activité microbienne consiste à :

- Transformer un grand nombre de substances organiques et inorganiques en solution inoffensive ou insoluble ;
- Altérer les conditions réduction/oxydation (redox) du substrat et ainsi influence la capacité des processus du marais ;
- Elle est impliquée dans le recyclage des nutriments.

Quelques transformations microbiennes sont aérobiques (c.à.d. nécessitent l'oxygène libre) et d'autre sont anaérobiques, c.à.d., elles sont capables de fonctionner sous les deux conditions aérobiques ou anaérobiques selon le changement des conditions du milieu.

La communauté microbienne d'un marais construit peut être influencée par les substances toxiques, tels que les pesticides et les métaux lourds, et des soins doivent être prises pour éviter de tels substances chimiques d'être introduites à des concentrations préjudiciables. (DUPOLDT et al; 1995).

2.4.1.3. Les animaux

Les marais construits offrent un habitat pour une diversité riche d'invertébrés et de vertébrés. Les animaux invertébrés, tel que les insectes, et les vers ; contribuent au processus de traitement en fragmentant le détrit et consommant la matière organique ;

les larves de plusieurs insectes sont aquatiques et consomment des quantités significatives des matériaux durant leurs stades larvaires, qui peut durer pour plusieurs années. Les invertébrés accomplissent aussi un nombre de rôles écologiques ; par exemple, les nymphes des libellules sont des prédateurs importants des larves des moustiques.

Malgré que les invertébrés sont les animaux les plus importants en matière de l'amélioration de la qualité d'eau, les marais construits attirent aussi une variété d'amphibiens, tortues, oiseaux et mammifères. (DUPOLDT et al; 1995).

2.5 Les types des marais artificiels

Il y a différents types de marais construits : bassin à écoulement en surface, bassin à écoulement sous surface et des systèmes hybrides, qui incorporent les deux systèmes précédents. (DUPOLDT et al; 1995).

2.5.1 Bassin à écoulement en surface :

Un bassin à écoulement en surface (SF surface flow) consiste en un bassin profond, sol ou autre matériel pour supporter les racines de la végétation, et une structure contrôlant l'eau pour maintenir une petite profondeur. Des marais à écoulement en surface ressemblent aux marais naturels et peuvent offrir un habitat naturel et des bénéfices esthétiques en plus du traitement d'eau. Dans le marais à écoulement en surface, les couches superficielles sont souvent anaérobiques. Les marais des eaux de tempête et les marais construits pour traiter les eaux de drainage des mines et les ruissellements d'agriculture sont habituellement des marais à écoulement en surface.

Les marais à écoulement en surface sont quelque fois appelés des marais à surface d'eau libre ou, s'il sont pour les eaux de drainage des mines, des marais aérobiques. Les avantages des marais à écoulement en surface sont que leur coût capital et de fonctionnement sont bas, et que leur construction, fonctionnement et maintenance sont simples. L'inconvénient principal des systèmes à écoulement en surface est qu'ils nécessitent une plus grande surface que les autres systèmes. (DUPOLDT et al; 1995).

2.5.2 Bassin à écoulement sous-surface :

Un bassin à écoulement sous surface (SSF Sub-Surface Flow) consiste en un bassin en cachette avec un substrat poreux de roche ou de gravier. Le niveau d'eau se présente sous la surface du substrat. Dans la plupart des systèmes des Etats Unies, l'écoulement est horizontale, bien que quelques systèmes Européens utilisent des flux à écoulement vertical. Les systèmes à écoulement sous surface sont appelés par plusieurs noms : les lits immergés végétés (vegetated submerged bed), la méthode de zone de racine (root-zone method), le filtre microbien de roche - phragmite (microbial rock reed filter), et les systèmes filtrants plante – roche (plant – rock filter systems).

A cause des contraintes hydrauliques imposées par le substrat, les filtres à écoulement sous surface sont plus convenables aux eaux usées à basses concentrations en solides et sous des conditions d'écoulement uniformes. Les filtres à écoulement sous surface ont été souvent utilisés pour réduire la demande biochimique en oxygène (DBO₅) des eaux usées domestiques. (DUPOLDT et al; 1995).

On distingue deux types de filtres plantés suivant le sens d'écoulement :

➤ Les filtre plantés à écoulement vertical

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

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

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

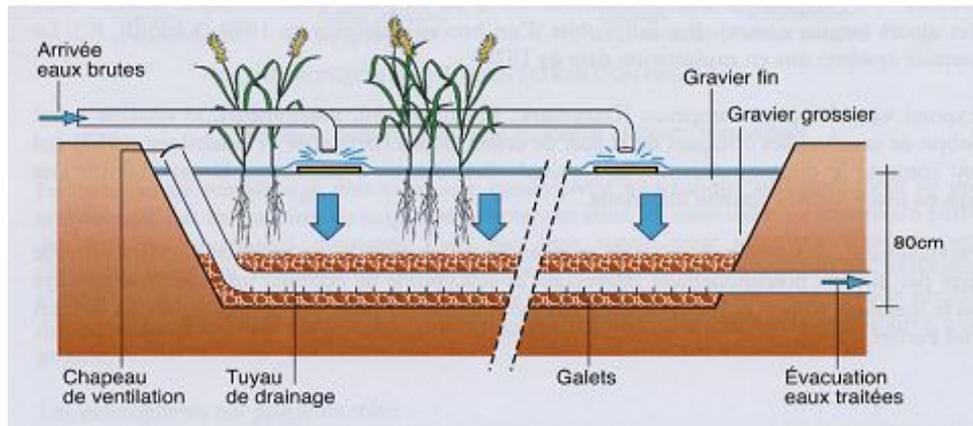


Figure 2.1 : Coupe transversale schématique d'un filtre à écoulement vertical (POULET et al, 2004).

➤ Les filtres plantés à écoulement horizontal

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

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

Le niveau d'eau dans un filtre horizontal est normalement constant. L'aération est limitée par l'absence d'un mouvement de la ligne de saturation et se fait de manière très faible par une diffusion gazeuse. L'apport d'oxygène est faible par rapport à la demande totale. La pénurie en oxygène, limite la dégradation de la pollution carbonée et azotée,

oxydation du carbone organique et de l'ammonium, et par conséquent limite la croissance bactérienne hétérotrophe et autotrophe. (POULET et al, 2004)

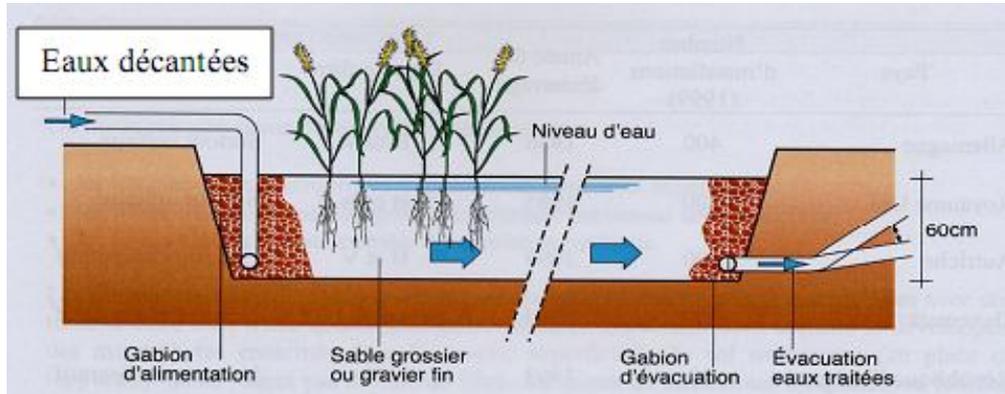


Figure 2 : Coupe transversale schématique d'un filtre à écoulement horizontal (POULET et al, 2004)

2.5.3 Les systèmes hybrides

Les systèmes hybrides à plate forme nécessite que tous les processus de prélèvement auront lieu dans le même espace. Dans les systèmes hybrides il y a plusieurs cellules désignées pour différents types de réactions.

Un traitement effectif des drainage de mines peut nécessiter une séquence de différentes cellules de marais pour promouvoir les réactions aérobiques – anaérobiques. Comme pour le prélèvement de l'ammoniac des eaux usées d'agriculture.

2.7. Principe de fonctionnement

L'épuration est réalisée selon le principe de l'épuration biologique majoritairement aérobie dans les milieux granulaires fins à grossier. (POULET et al, 2004). Selon LECOMTE (1998), le principe consiste à développer des étendues marécageuses au travers desquelles coulent les effluents. Lors de la traversée du marécage, les métaux lourds, présents en grande quantité dans l'effluent, sont immobilisés par l'action de végétation (flore bactérienne, algues, phragmite et plantes supérieures du marais.....). Lorsqu'il s'agit d'eaux usées, l'action des microorganismes et

de la végétation provoque la dégradation des matières organiques et la dénitrification des eaux. En aval, on obtient ainsi une eau de qualité acceptable qui peut être envoyée telle qu'elle dans le réseau hydrologique, sans risquer d'empoisonner le milieu naturel.

Lors de la mise en place de zones humides, retenant temporairement les effluents, on crée un milieu riche en matière organique et en végétation, où vont se développer des conditions anaérobies. De telles conditions favorisent la réduction des composés, solubilisés précédemment par l'oxydation. Elles provoquent notamment la précipitation des métaux lourds sous forme sulfurée, principalement grâce à l'action catalytique des bactéries (appelées d'ailleurs sulfo-réductrices). Les métaux, immobilisés sous forme sulfurée, peuvent rester dans cet état, sans préjudice pour le milieu, tant que les conditions sont maintenues. (LECOMTE, 1998)

Selon le même auteur, le phénomène provoque également la neutralisation de l'acidité de l'eau, notamment par la forte production d' H_2S gazeux liée à l'activité bactérienne.

Si le mécanisme prépondérant reste la sulfo-réduction bactérienne, l'action des autres groupes de végétaux n'est pas négligeable; par exemple, l'absorption d'ions métalliques est effective par les algues ou d'autres plantes supérieures : ou encore, la filtration des particules fines en suspension est réalisée au travers des enchevêtrements des racines ou d'appareils végétaux immergés. (LECOMTE, 1998)

2.7.1. Rôle des microorganismes

Particulièrement proliférantes en milieu humide, les bactéries se nourrissent des matières dont sont chargés les eaux usées. Véritables « ciseaux biologique » elles les transforment en molécules inoffensives. La dégradation de la matière organique et la dénitrification d'azote dans la région des racines des plantes où s'effectue le traitement est médiaturé par les microorganismes. L'émission d'oxygène par les racines des macrophytes crée des zones oxydées autour des racines. La plupart du contenu organique des eaux résiduaires est décomposé en dioxyde de carbone (CO_2) et eau dans ces zones en utilisant l'oxygène comme dernier accepteur d'électrons. En plus l'ammoniaque est oxydé en nitrates par bactéries nitrifiante dans ces zones. Ici la dégradation de la matière

organique peut avoir lieu par bactéries dénitrifiantes. Par ces processus les nitrates sont convertis en azote (N_2), qui s'évapore vers l'atmosphère. Dans une région de la rhizosphère, la matière organique peut être décomposée anaérobiquement en dioxyde de carbone (CO_2) et méthane (CH_4) par des processus fermentifs. L'existence simultanée des zones oxydées, anoxiques, et de réduction, et l'interaction entre les différents types de processus de dégradation microbiennes dans ces zones, est essentielle pour une décomposition de la matière organique et un prélèvement des nutriments efficace dans la région des racines des plantes où s'effectue le traitement. En plus de telles interactions peuvent être favorables pour la décomposition des composés persistants, tel que les hydrocarbures chlorés (KOBAYASHI et RITTMAN, 1982 ; TIEDJE et AL, 1984 in BRIX, 1986).

2.7.2. Rôle des macrophytes

Au delà de l'aspect esthétique, les macrophytes contribuent indirectement à la dégradation des matières volatiles en suspension (MES) de l'effluent brute ;

La croissance des racines et des rhizomes permet 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. Toutefois dans des filtres à écoulement horizontal, il ne faut pas escompter une conductivité hydraulique supérieure à celle des matériaux d'origine. (POULET et al, 2004).

La couverture foliaire est un régulateur thermique ayant un impact sur les rendements épuratoires sous des climats froids.

De petites quantités d'oxygène provenant des parties aériennes sont rejetées à l'apex des radicelles des plantes, mais elles sont insuffisantes pour contribuer seules à la satisfaction des besoins d'oxygène de la biomasse bactérienne, responsable de la dégradation. (POULET et al, 2004)

Selon le même auteur, **le développement racinaire** accroît la surface de fixation pour le développement des microorganismes et pour des réactions de précipitation. A cet accroissement de surface active, s'ajoute très certainement aussi un facteur encore très mal documenté de stimulation de l'activité, voire de la diversité et de la densité des microorganismes, impliqués à divers titres dans les processus épuratoires. Il s'agit d'un concept bien connu en agronomie et qui peut se résumer sous la forme triviale suivante « un sol planté est biologiquement plus riche et actif qu'un sol nu ». Les tissus racinaires et leurs exsudats constituent vraisemblablement des niches plus accueillantes pour les microorganismes que des substrats minéraux inertes.

Le rôle du métabolisme des plantes (assimilation des nutriments) affecte plus ou moins le traitement en fonction des surfaces mises en jeu. Si pour les filtres plantés verticaux l'assimilation est négligeable, les surfaces plus importantes mises en jeu dans les filtres horizontaux peuvent conduire à de prélèvement pouvant être raisonnablement prises en compte dans les bilans, mais qui devraient cependant se situer au maximum à 20% pour l'azote et 10% pour le phosphore. Tous ces éléments ne sont pas directement exportables dans la biomasse faucardable, mais se trouvent aussi piégés dans le système racinaire dont le devenir à long terme, c'est-à-dire 10-15 ans, n'a pas encore été étudié. (POULET et AL, 2004)

2.8. Plantes utilisées

Plusieurs plantes ont été utilisées dans le processus de la phytoépuration, mais les espèces les plus utilisées sont celles supportant des conditions hydriques en excès ou se développant en bordures des cours d'eau; souvent des roseaux, jonc, massette, bambous, ...etc. Pour cette étude on a choisi quatre espèces :

2.8.1. *Phragmites communis*

Phragmites Adans-Roseau

Plante vivace à rhizome rampant, très ramifié, émettant des tiges nombreuses, élevées (de 60 cm à deux mètres), dures et luisantes ; feuilles glauques, à ligule courte et ciliée, à limbe de plusieurs décimètres de long et large d'un pouce, très pointu au sommet et rude sur les bords, strié en long sur les deux faces ; inflorescence grande, très étalée, brun-jaunâtre, à axe velu sur les nœuds inférieurs ; épillet très nombreux, grands (1-2 cm), à glumes très inégales, à axe sinueux très velu, portant 4 – 10 fleurs à longue arête.- Espèce cosmopolite, surtout représentée au Sahara par une forme à feuilles courtes, raides et piquantes, un peu enroulées en long, à tiges plus courtes que dans le roseau habituel d'Europe. Lits des torrents, gueltas, un peu partout au Sahara septentrional, occidental et central. *Cosmop.* **Ph communis** Trin (OZENDA, 1991)



Photo 2.1 : Le *Phragmites communis*

2.8.2 *Bambusa.sp*

Les Bambous comprennent plusieurs genres botaniques d'origine tropicale dont certaines espèces sont rustiques. Ce sont des graminées ligneuses dont les chaumes ont été autrefois utilisés pour faire des cannes à pêche et sont encore d'excellent tuteur. Hormis le bambou nain assez différent, ils ont en commun plusieurs caractères : cannes bien droites,

généralement non ramifiées, feuilles étroites, souvent vert foncé et brillant dessus, plus claires au revers. (BOUARD et al, 1992)

Tous ont des feuillages persistants, à croissance rapide, et sont faciles à installer. Mais, la prolifération rapide de leurs souche tranchantes fait qu'ils envahissent l'espace rapidement. (PEREIRE, 2006)

Logueur : de 0,50 à 6 m selon les espèces

Terre : toutes, mais humides

Exposition : soleil

Multiplication : jeunes pousses prises en printemps

Feuillage : persistant ou caduc



Photo 2.2 : *Bambusa.sp*

2.8.3. *Cyperus papyrus*

Au bord de l'eau le *Cyperus* développe d'impressionnantes tiges souples bien vertes que coiffent des feuilles disposées en rayon. (PEREIRE, 2006)

Longueur : de 60 à 120

Etagement et distance de plantation : 30 cm

Terre : ordinaire, humide

Exposition : ensoleillée

Multiplication : par bouture et par division des touffes

Ce genre compte plus de six cent espèces de laïches, dont des annuelles et des vivaces persistantes, répandus surtout dans les habitats humides de presque toutes les régions du globe, sauf les plus froides.

Les larges touffes d'épaisses tiges cylindriques ou triangulaires portent des feuilles graminiformes issues de la base et sont coiffées d'inflorescences compactes ou de grandes ombelles de petits épis floraux paléiformes.

La plupart des espèces ornementales se plaisent au bord de l'eau ou en sol marécageux. Elles tolèrent les rayons directs du soleil. Multiplier par semis ou division. (BURNIE et al ;1999)



Photo 2.3 : *Cyperus papyrus*

2.8.4 Nerium Oleander

Son nom : *Nerium*, vient de Nerion qui signifie en grec « eau ». Laurier rose en effet, préfère les terres bien arrosées. Ses feuilles seront alors plus grandes et sa floraison plus abondante. (PEREIRE, 2006)

Le Laurier Rose est un arbuste vigoureux, touffu, à port dressé et arrondi. Feuilles de texture ferme, allongées, pointues. Fleurs en forme de Pervenche, groupées en bouquets terminaux, pendant toute la belle saison. C'est un arbuste d'une grande beauté dont il existe de très nombreuses variétés, à fleurs simples ou doubles, dans de merveilleux coloris vif ou pastel. A signaler que toutes les parties de la plante sont toxiques. (BOUARD P et al,1992)

De hauteur de 1 à 4 m, à longues feuilles lancéolées, persistantes, glabres, verticillées par trois, à nervure médiane très saillantes en dessous ; inflorescence en cyme ; fleurs à grande corolle (3-5 cm), roses ou plus rarement blanches ; capsules longues (8-10 cm), libérant des graines couvertes de nombreux poils roux. La plante est très toxique, notamment pour les chameaux (OZENDA, 1991)



Photo 2.4 : *Nerium oleander*

2.9. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons passé en revue les principales recherches, relatives à la technique d'épuration par filtres plantés à macrophytes dite la phytoépuration ou Marais artificiels. En effet, en se basant sur une panoplie de recherches telles que celles de Brix (1997), Dupoldt (1995), Sherwood (1993), Poulet (2004) et bien d'autres, nous avons essayé de présenter l'essentiel de la phytoépuration.

En effet, les systèmes les plus connus sont : le système à écoulement superficiel (SF, Surface Flow), le système à écoulement sous superficiel (SSF, Sub-Surface Flow) et les systèmes hybrides. Pour ces trois catégories de systèmes de phytoépuration il a été présenté la typologie et les mécanismes d'élimination des éléments polluants. Une description des plantes utilisées a été également effectuée.

3.1. Introduction

L'hydrologie est un facteur très important dans la conception d'une installation de phytoépuration, car un tel système communique directement avec l'atmosphère à travers la pluie et l'évapotranspiration.

Le présent chapitre sera entièrement consacré à la présentation des caractéristiques climatiques de la région de Biskra et en particulier l'université de Biskra où ont été effectués les essais expérimentaux.

3.2. Situation géographique

Ce travail a été réalisé au niveau d'une station à proximité du département d'hydraulique de l'université de Biskra.

Située à environ 470 Km au Sud-Est d'Alger, Biskra capitale des Zibans ; se trouve à une altitude de 124 m, sa latitude est de 34.48 (N) est sa longitude est 5.44 (E). (A.N.A.T., 2002).

Cette wilaya est limitée :

- Au nord par la wilaya de Batna et la wilaya de M'sila ;
- À l'est par la wilaya de Khenchla ;
- À l'ouest par la wilaya de Djelfa ;
- Au sud par la wilaya d' El Oued.

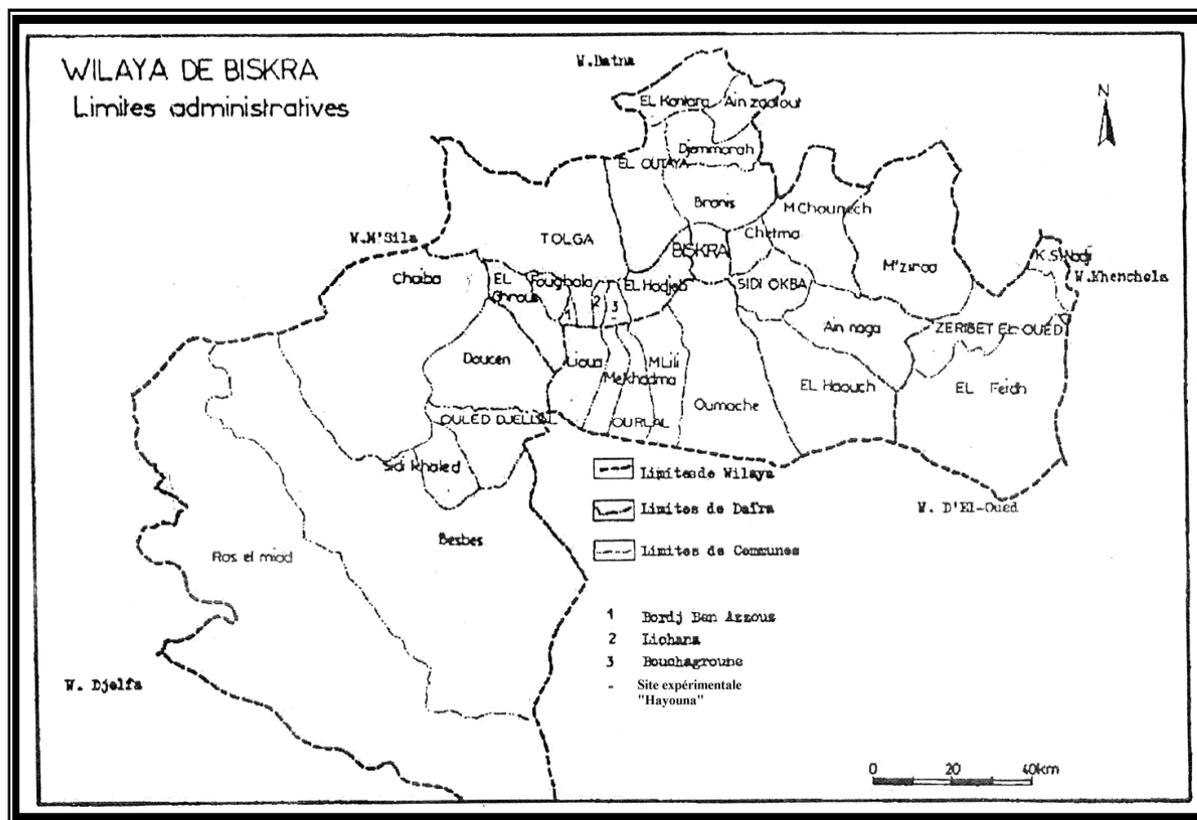


Figure 3.1 : Carte géographique de Biskra (A.N.A.T, 2002)

3.3. Caractéristiques édaphiques

La région d'étude est sous l'influence de l'effet conjugué de l'aridité du climat, de la nappe phréatique et de l'irrigation par les eaux salées. L'étude pédologique fait apparaître les grands traits de la pédogenèse des sols des climats arides : les sols gypseux et les sols salés.

Il apparaît toutefois nettement que les sols de la zone aride d'Algérie sont diversifiés et se répartissent par exemple selon la classification française (C.P.C.S. ,1967) en 8 classes de sol : les sols minéraux bruts, les sols peu évolués, les sols calcimagnésiens, les sols à sesquioxydes de fer, les sols isohumiques, les sols salsodiques, les vertisols et les sols hydromorphes. Les sols de cette zone diffèrent surtout par leur texture, leur morphologie, le mode d'évolution pédogénétique et par le niveau et le mode de salinisation. Leur extension spatiale est très variable. Mais cette diversité ne doit pas cacher leur caractère principale et quasi-général : le grand rôle que jouent les sels au sens large du terme (le calcaire, le gypse et les sels solubles). (HALITIM, 1988)

- Le quartz, l'argile et les sels sont, en zone aride, les constituants essentiels d'un même système dynamique.
- Le calcaire, le gypse et les sels solubles sont omniprésents dans les sols des zones arides. Ils se distribuent d'une manière séquentielle et s'interpénètrent souvent. Ils jouent un rôle essentiel dans la genèse, le fonctionnement et le comportement des sols de ces régions et donc dans leur mise en valeur.
- Les sels ont des relations, se traduisant par des organisations structurelles différentes avec les autres constituants du matériau pédologique. (HALITIM, 1988).

3.4. Caractéristiques climatiques

Les oasis des Ziban sont parmi les zones arides caractérisées par un climat toujours peu pluvieux et parfois sec avec une pluviosité très irrégulière et inférieure à 200 mm/an (DUBOST, 2002).

3.4.1. Les températures

Du fait de la pureté de leur atmosphère et souvent aussi de leur position continentale, les déserts présentent de forts maximums de température et de grands écarts thermiques. La température est un facteur favorable lorsqu'il y a suffisamment d'eau, et de fait les mares, les suintements ou les oueds représentent un milieu biologique très riche. Mais en milieu sec

la température devient un facteur aggravant car, elle augmente la vitesse de l'évapotranspiration. (OZENDA, 1991).

La température représente un facteur limitant de toute première importance car elle contrôle l'ensemble des phénomènes métaboliques et conditionne de ce fait la répartition de la totalité des espèces et des communautés d'êtres vivants dans la biosphère. (RAMADE, 2003).

Tableau 3.1 : Températures moyennes mensuelles (mm) dans la région de Biskra durant la période (1984-2009) et en 2009.

Mois		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moy
Tp (°C)	1984-	11.6	13.6	17	20.7	26.1	31.2	34.3	33.9	28.9	23.1	16.5	17	22.82
	2009													
	2009	11.9	12	15.9	18.5	26.2	32	35.8	34.7	27.1	22.9	16.8	13.1	22.24

Durant la période (1984-2009), les températures moyennes mensuelles les plus basses sont enregistrées durant le mois de janvier (11,6°C). Les températures moyennes mensuelles maximales sont enregistrées durant les mois de juillet et d'août avec respectivement 34,3 °C et 33,9 °C. (Tableau 3.1)

3.4.2. La pluviométrie

Elle constitue un facteur écologique d'importance fondamentale, non seulement pour le fonctionnement et la répartition des écosystèmes terrestres, mais aussi pour certains écosystèmes limniques tels que les mares et les lacs temporaires, et les lagunes saumâtres soumises à des périodes d'assèchement. (RAMADE, 2003).

Tableau 3.2 : Précipitations moyennes mensuelles (mm) dans la région de Biskra durant la période (1984 – 2009) et en 2009

Mois		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Cumul
P	1984-	19.4	9.1	14.7	12.7	11.3	4.1	0.7	3.9	13.9	10.8	17.5	11.4	129.5
	2009													
	2009	48.9	11.4	16	12	15.7	0	4	0	47.7	0	0.3	13.8	169.8

Durant la période (1984-2009) la période pluvieuse s'étale du mois de septembre jusqu'au mois de mai. Alors que durant l'année d'étude une irrégularité des pluies est remarquée avec

un pic au mois de janvier avec 48,9mm, et des moyennes de 0mm et 0,3mm respectivement durant les mois octobre et novembre. (Tableau 3.2)

3.4.3. L'humidité relative

Selon RAMADE (2003), c'est le rapport entre la teneur en vapeur d'eau de l'air et la masse théorique de vapeur d'eau que peut renfermer l'atmosphère à saturation compte tenu de la température et de la pression barométrique existante.

Tableau 3.3 : Humidité relative moyenne mensuelle (%) dans la région de Biskra durant la période 1984-2009 et en 2009.

Mois		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moy
HR %	1984-	57	48	42	37	33	29	26	29	39	46	53	59	41.5
	2009													
	2009	67	52	49	44	32	26	25	26	52	46	47	62	44

L'humidité relative varie entre 26% au mois de juillet et 59% au mois de décembre, alors que durant l'année d'étude (2009) les moyennes varient entre 25% au mois de juillet et 67% au mois de janvier. (Tableau 3.3).

3.4.4 Le vent

Il constitue en certains biotopes un facteur écologique limitant. Sous l'influence de vents violents, la végétation est limitée dans son développement. (RAMADE, 2003).

Il intervient des fois par sa violence, par les particules qu'il transporte et qui peuvent déchirer les parties aériennes des plantes, et par les remaniements qu'il provoque dans le sol. Cependant son action peut être quelquefois favorable, par exemple lorsqu'il provoque un important dépôt de sable sur des sols salés qui étaient stériles, ou bien lorsqu'il contribue à la dispersion des végétaux et de leurs semences. (OZENDA, 1991).

Tableau 3.4 : Vitesse moyenne mensuelle de jours du vent dans la région de Biskra durant la période (1984-2009)

Mois		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moy
Vitesse du vent en m/s	1984-	4.3	4.6	4.9	6	5.6	4.5	4	4	4.2	4	4.3	4.2	4.55
	2009													
	2009													

La vitesse du vent est d'une moyenne annuelle de 4,55 m/s, la moyenne minimale est enregistrée durant les mois de juillet et août avec 4 m/s ; alors que la moyenne maximale est enregistrée durant le mois d'avril. (Tableau 3.4)

3.4.5. L'ensoleillement

Selon RAMADE (2003), la photopériode contrôle la germination des végétaux, l'entrée en dormance et la reprise d'activité de l'apex des rameaux, leur croissance, la chute automnale des feuilles et enfin la floraison.

Tableau 3.5 : Nombre d'heures d'insolation mensuelle dans la région de Biskra durant la période (1984-2009) et en 2009

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moy
1984-2009	223	236	270	288	320	335	361	331	271	255	224	216	277.5
2009	175	243	293	294	360	362	363	331	256	310	260	222	289.08

Pour la période (1984-2009) ; le nombre moyen annuel d'heures d'insolation est (277.5 heures) par an. Le minimum est enregistré en decembre (216 heures) et le maximum en juillet (361 heures). Durant l'an 2009 ; le nombre moyen annuel d'heures d'insolation est (289.08 heures) par an. Le minimum en janvier (175 heures) et le maximum en juillet (363 heures). (Tableau 3.5)

3.5. Synthèse climatique

3.5.1. Diagramme Ombrothermique

Le diagramme Ombrothermique de GAUSSEN est une méthode graphique où sont portés en abscisses les mois, et en ordonnées les précipitations (P) et les températures (T) avec $P=2T$. L'intersection des deux courbes Pet T permet de définir la saison sèche.

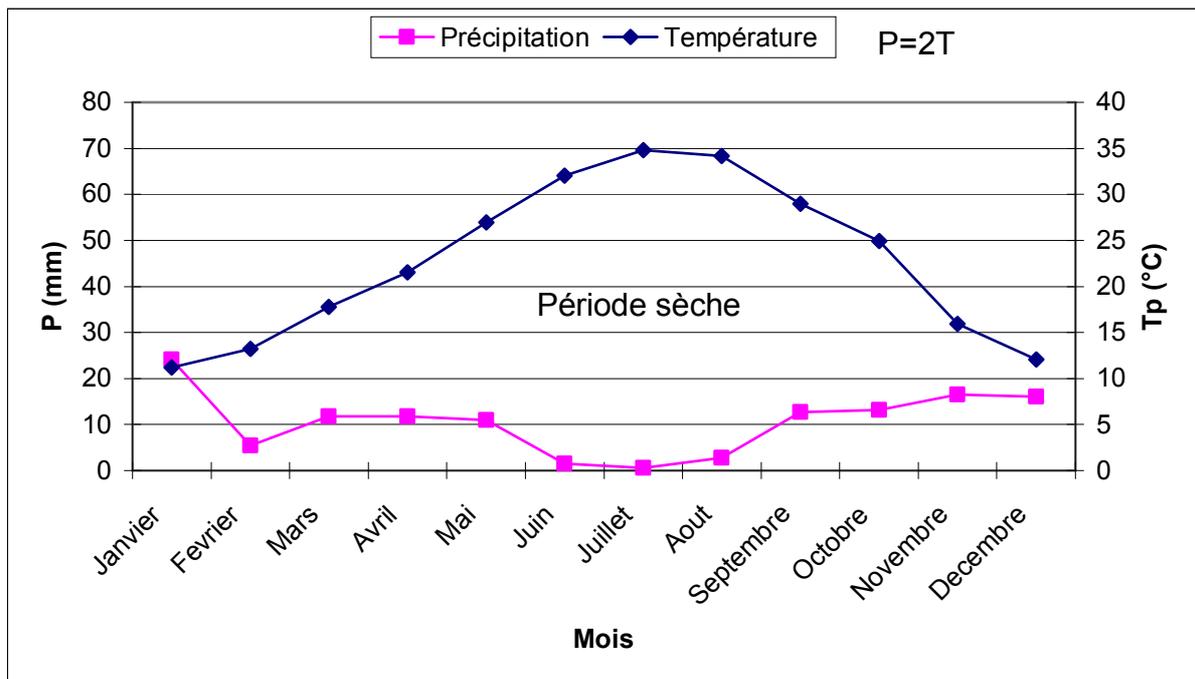


Figure 3.4 : Diagramme Ombrothermique de GausSEN de la région de Biskra (1984-2009)

3.5.2. Climagramme d'Emberger

Afin de déterminer l'étage bioclimatique de la région de Biskra, nous avons calculé le quotient pluviométrique d'Emberger (Q) avec des données climatiques calculées durant la période 1984 - 2009.

Selon la formule établie par Stewart (1969), le quotient pluviométrique de la région méditerranéenne est exprimé par la formule suivante :

$$Q = 3,43 \frac{P}{M - m}$$

Q : quotient pluviométrique

P : pluviométrie annuelle (mm)

M : moyenne maximale du mois le plus chaud (°C)

m : moyenne minimale du mois le plus froid (°C).

D'après les données climatiques de Biskra, pour la période qui s'étale de 1984 à 2009 nous avons :

La précipitation $P = 129,5 \text{ mm}$

La température maximale $M = 34,3^\circ\text{C}$

La température minimale $m = 11,6^\circ\text{C}$

$$Q = 3.43 * \frac{129.5}{34.3 - 11.6} = 19.56$$

Dans ce cas le quotient pluviométrique est : $Q = 19,56$

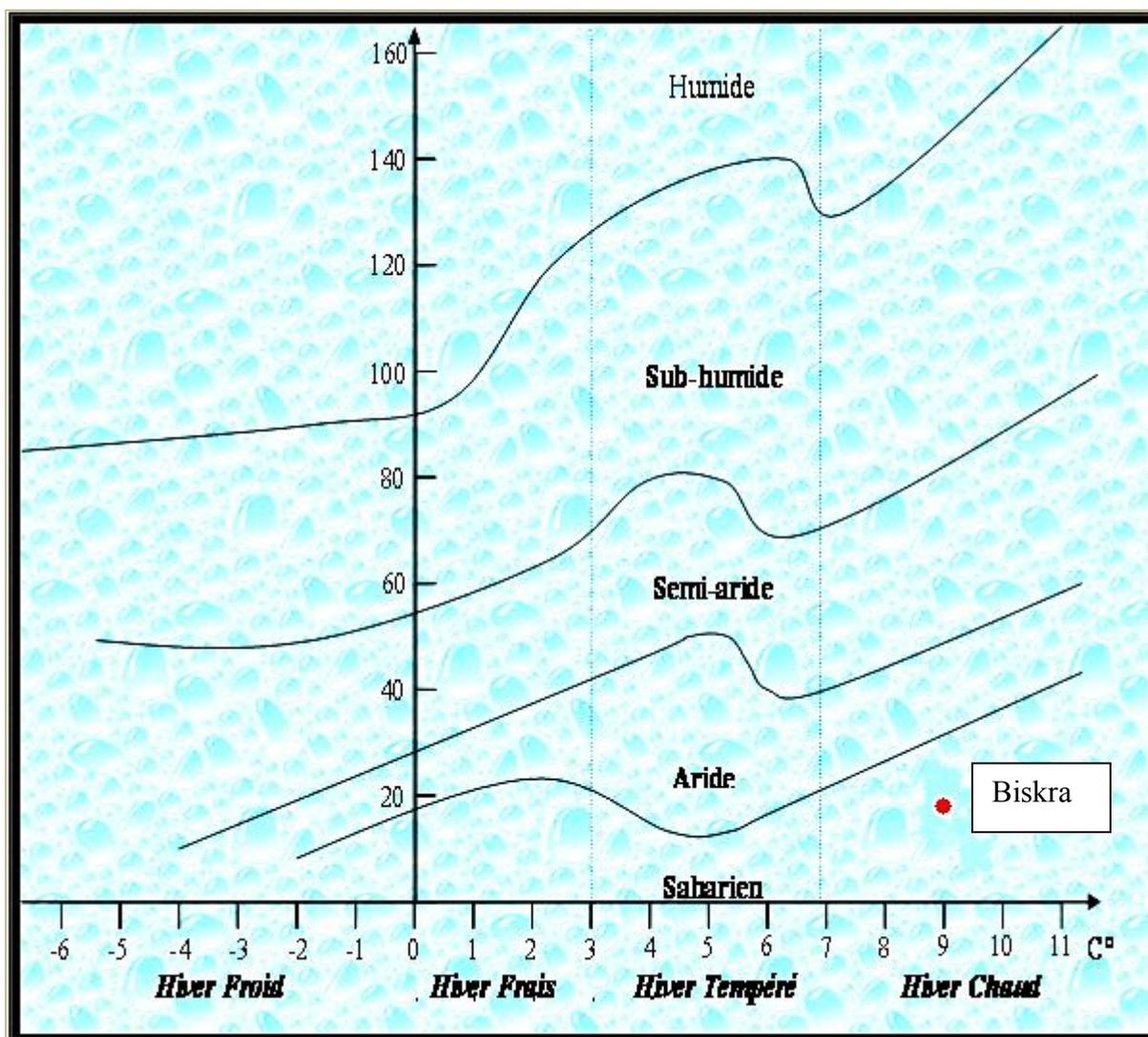


Figure 4.5 : Climagramme d'EMBERGER (Biskra 1995-2009)

L'observation du climagramme d'Emberger nous permet de situer la région de Biskra, dans l'étage bioclimatique aride inférieur ou saharien à hiver chaud.

3.6. La végétation

L'étude de la végétation de la zone des oasis de Ziban montre une liaison étroite entre la composition floristique et les conditions du milieu.

La végétation y est rare elle comprend d'un part des plants annuelles à croissance rapide qui fleurissent et fructifient après les rares périodes humides, d'autre part des plantes vivaces adoptées à la sécheresse. (ARBI, 2005)

Pour les oasis des Ziban caractérisées principalement par des sols à pédogenèse bien définie ; la végétation résultante de l'interaction sol-végétation permet de signaler la présence des groupements halophiles, psammophiles, gypsophiles et des groupements hygrophiles. (GALI, 2005)

La végétation actuelle est le résultat des interactions de trois facteurs ; climat, sol et action anthropique. L'existence des nappes favorise le développement des palmeraies dattiers dans de nombreuses Oasis comme ; Tolga, Borge Benazzouze, Ourlel et Oumech. Les cultures maraîchères sont pratiquées ; aussi ; comme culture intercalaire.

3.7. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation des caractéristiques climatiques de la région de Biskra. Les paramètres climatiques ont permis de situer la région dans un climat aride inférieur ou saharien à hiver chaud, avec une précipitation moyenne annuelle de 129,5 mm et des températures moyennes mensuelles maximales durant les mois de juillet et d'août respectivement de 34,3 °C et 33,9 °C.

4.1. Introduction

Ce chapitre a pour objectif de montrer la procédure expérimentale adoptée, afin d'évaluer le pouvoir épurateur de quatre plantes macrophytes, à savoir : *Phragmites communis*, *Bambusa sp*, *Cyperus papyrus* et *Nerium oleander*. Pour cela, l'analyse de quelques paramètres physico-chimiques de plus de 100 échantillons a été effectuée au laboratoire d'agronomie de l'université de Biskra et au laboratoire de traitement des eaux de la société TIFIB.

4.2. Préparation du dispositif expérimental

4.2.1. Matériels utilisés

Pour bien accomplir l'analyse expérimentale des quatre plantes citées plus haut, nous avons utilisé le matériel suivant :

- 13 bassines identiques de forme ronde et en matière plastique, d'une hauteur de 28 cm, de base supérieure de 50 cm et de base inférieure de 42 cm de diamètre.
- Tube en PVC de 50 cm de diamètre pour assurer l'entrée de l'air au fond des bassines et pour faciliter la mesure des paramètres physico-chimiques (pH, oxygène dissous, la température, Salinité).
- Robinets en plastique au fond des bassines pour l'évacuation de l'eau épurée.
- On a utilisé un gravier de différentes tailles (4 tailles), et on les a mis dans les bassines (après tamisage et lavage) en couches décroissantes de bas en haut.

4.2.1.1. Matériel végétal

Le dispositif expérimental est constitué de trois blocks comprenant chacun 4 espèces : *Phragmites communis* ; *Bambusa sp* , *Cyperus papyrus* et *Nerium oleander*.

Phragmites

Nom commun : Phragmites Adans-Roseau

Famille : Poacées

Espèce :

Phragmites communis

Date de prélèvement hors sol : 27/12/2008

Date de mise en place aux eaux usées : 08/02/2009

Origine : Djamorah



Photo 4.1. : *Phragmites communis* (racines)

Bambusa

Nom commun : Bamboo

Famille : Poacées

Espèce :

Bambusa sp

Date de prélèvement hors sol : 04/01 /2009

Date de mise en place aux eaux usées : 08/02/2009

Origine : Biskra



Photo 4.2 : *Bambusa.sp* (racines)

Cyperus

Nom commun : Cyperus

Famille : Cyperacées

Espèce :

Cyperus papyrus

Date de prélèvement hors sol : 27/12 /2008

Date de mise en place aux eaux usées : 08/02/2009

Origine : Biskra





Photo 4.3 : *Cyperus papyrus* (racines)

Nerium

Nom commun : Laurier rose

Famille : Apocynacées

Espèce :

Nerium oleander

Date de prélèvement hors sol : 04/01 /2009

Date de mise en place aux eaux usées : 08/02/2009

Origine : Djamorah



Photo 4.4 : *Nerium oleander* (racines)

4.2.1.2. Préparation du substrat

Le substrat est constitué de gravier qui a été préalablement tamisé en 4 groupes selon les dimensions pour constituer quatre couches superposées verticalement après lavage.



Photo 4.5 : Galet



Photo 4.6 : Gravier grossier



Photo 4.7 : Gravier moyen



Photo 4.8 : Gravier fin

Tableau 4.1 : Caractéristiques du substrat

Substrats	Taille	Epaisseur de la couche
Galet	2 à 5 cm	4 cm
Gravier grossier	0,7 à 2 cm	8 Cm
Gravier moyen	0,5 à 0,7 cm	5 Cm
Gravier fin	0,2 à 0,5 cm	6 Cm

4.2.1.3. Remplissage des bassines et emplacement des plantes

Dans cette étape on a procédé comme suit :

- Fixation d'un robinet à une hauteur de 4 cm du fond de chaque bassine, permettant de prélever les eaux usées après une durée d'incubation dans chaque bassine (le robinet été emballé du côté intérieur par un filtre pour éviter l'introduction du gravier) ;
- Remplissage des deux premières couches : galet et gravier grossier ;
- Emplacement du tube PVC perforé enveloppé par un tamis (pour vérifier le niveau d'eau dans chaque bassine, le tamis est utilisé pour éviter les particules de gravier de s'introduire dans le tube et de le boucher) ;
- Implantation des les plantes ;
- Enfin, le remplissage est achevé par l'ajout des deux dernières couches ; le gravier moyen et le gravier fin.



Photo 4.9 : Remplissage des bassines et emplacement des plantes

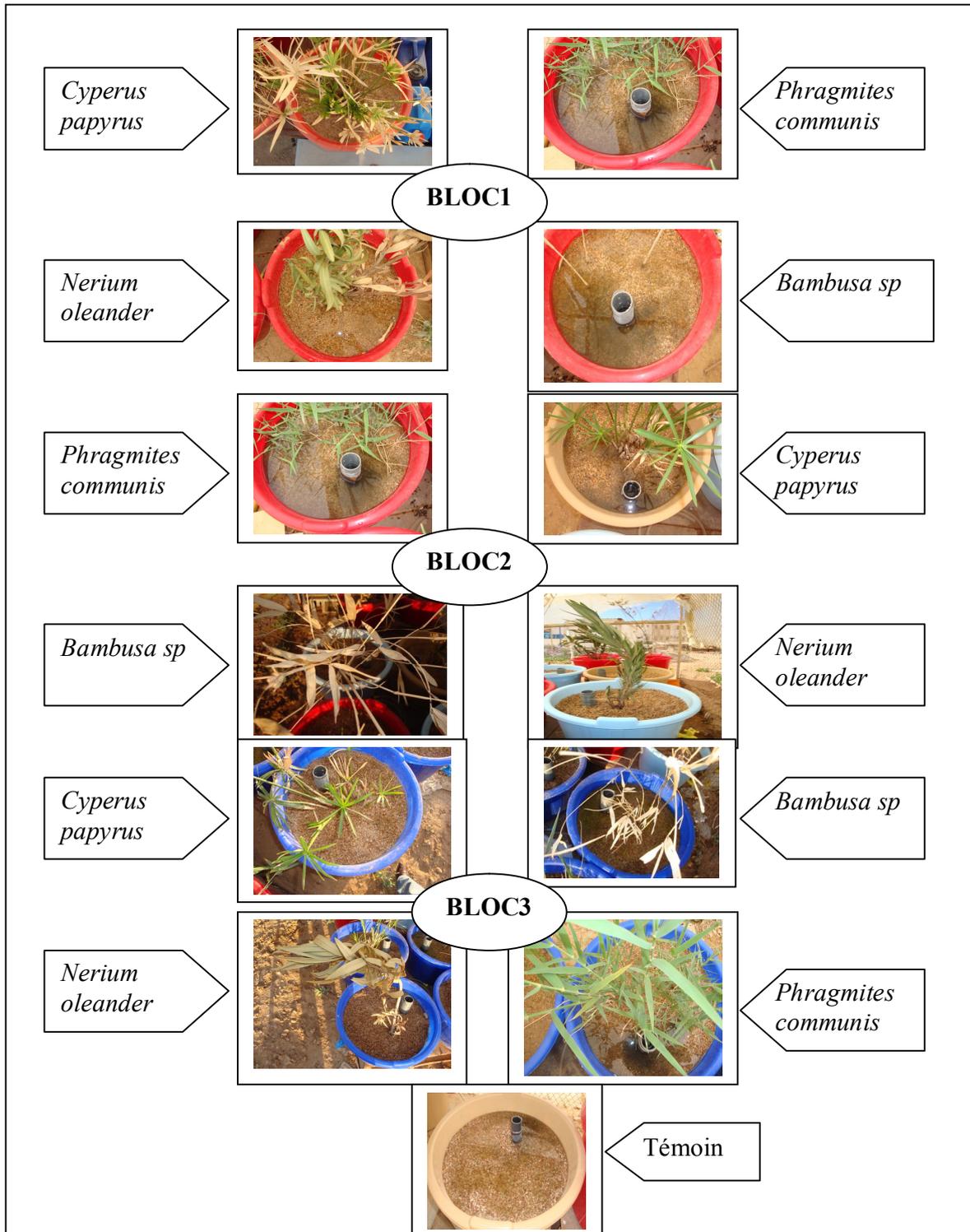


Fig 4.1 : Le dispositif expérimental

4.3. Irrigation par les eaux usées

On a procédé premièrement à une période d'adaptation où les plantes ont été irriguées par les eaux usées comme suit :

- La date du premier remplissage des bassines est le : 16 Mars 2009
- Le temps de séjour étant de 5 jours, le premier prélèvement a été donc le : 21 Mars 2009
- Les prélèvements des eaux épurées du 22 et 26 Mars sont réalisés sans ajouter des eaux usées brutes aux bassines.
- On a récupéré les quantités d'eau des bassines le 29 Mars 2009, et on a procédé aux analyses le 02 Avril 2009.



Photo 4.10 : Irrigation par les eaux usées

Le tableau suivant résume le calendrier de la procédure expérimentale :

Tableau 4.2 : Calendrier de la procédure expérimentale

DATE DE REMPLISSAGE	DURÉE D'INCUBATION	DATE DES ANALYSES
MOIS D'AVRIL 19/04/2009	1 jour 1 jour 1 jour 1 jour 1 jour 1 jour	20/04/2009 21/04/2009 22/04/2009 23/04/2009 24/04/2009 25/04/2009
MOIS DE MAI 25/04/2009	1 semaine 1 semaine 1 semaine 1 semaine	03/05/2009 09/05/2009 16/05/2009

MOIS DE JUIN 22/05/2009	1 semaine 1 semaine 1 semaine	30/05/2009 06/06/2009 13/06/2009 20/06/2009
----------------------------	-------------------------------------	--

4.4. Analyse au laboratoire

Les analyses ont été réalisées au niveau du laboratoire du département d'agronomie, et celui de la société TIFIB, en utilisant les méthodes présentées au tableau 3.3. Le détail de ces méthodes est cité dans les listes annexes.



Photo. 4.11 : Appareillage ayant servi aux analyses physico-chimiques au niveau du laboratoire du département d'agronomie.

Tableau 4.3 : Méthodes d'analyses des paramètres physico-chimiques.

Paramètre	Méthode.
Conductivité Electriques CE (ds/cm)	Conductimètre
pH	Méthode électrométrique avec pH mètre.
Oxygène dissous (mg/l).	Oxymètre
DBO (mg d'oxygène/l)	DBOmètre
DCO (mg d'oxygène/l)	Dosage avec titration
Nitrate, sulfate, phosphate, (mg/l)	Méthode turbidimétrique au colorimètre (spectrophotomètre).
Turbidité (NTU).	Méthode turbidimétrique au colorimètre
Matière en suspension (mg/l)	Filtration et séchage avec l'étuve.

**Photo. 4.12 :** les plantes au début de l'expérimentation.



Photo. 4.13 : les plantes après cinq mois d'irrigation.

4.5. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre, les matériels et méthodes permettant l'évaluation du pouvoir épurateur de quatre plantes macrophytes, à savoir : *Phragmites communis*, *Bambusa sp*, *Cyperus papyrus* et *Nerium oleander*. Sur une période de 3 mois Il a été procédé à l'analyse au laboratoire, pour plus de 100 échantillons, des paramètres physico-chimiques des eaux usées avant et après irrigation de ces plantes. Les paramètres testés sont : DBO, DCO, Ortho-Phosphate, Turbidité, couleur, Matière en suspension, pH, conductivité électrique, oxygène dissous et azote Ammoniacal. Les expérimentations ont été réalisées dans la station expérimentale du département d'hydraulique. Une partie des analyses a été effectuée au laboratoire de TIFIB et l'autre partie au laboratoire du département d'agronomie de l'Université de Biskra.

CONCLUSION GENERALE

Nous nous sommes intéressés dans ce mémoire de magister, à l'étude du rôle de la végétation dans l'épuration des eaux usées dans les régions arides. Pour cet objectif, l'étude s'est proposée d'analyser expérimentalement les potentialités épuratrices de quelques plantes macrophytes, à savoir : *Bambusa.sp*, *Cyperus papyrus*, *Phragmites communis* et *Nerium oleander*. Cinq grands chapitres ont été nécessaires :

A travers le premier chapitre, nous avons présenté en premier, les origines et caractéristiques des eaux usées, où il a été montré qu'ils proviennent d'origine domestique, industrielle, pluviale et/ou ruissellement urbains. Nous avons montré ensuite, les différentes méthodes utilisées pour leur épuration, où nous avons valorisé la technique d'épuration par filtres plantés à macrophytes.

Le deuxième chapitre a été consacré aux principaux travaux, relatifs à la phytoépuration ou Marais artificiels. Il ressort que les systèmes les plus connus sont : le système à écoulement superficiel (SF, Surface Flow), le système à écoulement sous superficiel (SSF, Sub-Surface Flow) et les systèmes hybrides. Pour ces trois catégories de systèmes de phytoépuration il a été présenté la typologie et les mécanismes d'élimination des éléments polluants. Une description des plantes utilisées a été également effectuée.

Le troisième chapitre s'est intéressé à la présentation des caractéristiques climatiques de la région de Biskra et en particulier l'université de Biskra où ont été effectués les essais expérimentaux. L'observation du climagramme d'Emberger nous permet de situer la région de Biskra, dans l'étage bioclimatique aride inférieure ou saharienne à hiver chaud.

Le quatrième chapitre a concerné les matériels et méthodes utilisés afin d'évaluer le pouvoir épurateur des quatre plantes macrophytes. Sur une période de 3 mois, il a été procédé à l'analyse au laboratoire, de plus de 100 échantillons, des paramètres physico-chimiques des eaux usées avant et après irrigation de ces plantes. Les paramètres testés sont : DBO₅, DCO, Ortho-Phosphate, sulfate, nitrate, turbidité, couleur, matière en suspension, matière organique, pH, conductivité électrique, oxygène dissous et azote Ammoniacal.

Le cinquième et dernier chapitre a eu pour but de présenter les résultats, issus des analyses physicochimiques des eaux usées, avant et après irrigation des plantes testées. Deux espèces parmi les quatre ont présenté un arrêt de développement : *Bambusa.sp* et *Nerium oleander*, elles sont devenues jaunes et se sont séchées. Ceci

est probablement dû au fait qu'elles n'aient pu supporter les nouvelles conditions de salinité et de pollution, à cause des eaux usées utilisées. Les deux autres espèces, *Phragmites communis* et *Cyperus papyrus* ont montré, par contre, une grande tolérance aux conditions strictes de sécheresse et de salinité avec un développement assez acceptable. Ainsi elles ont présenté des efficacités dans le traitement des eaux usées, comparé au système non planté (témoin) comme suit :

- Le *Phragmites communis* a montré son efficacité en matière d'élimination de : MES, MO, pH, CE, NH_3^+ et SO_4^{-2} .

- Le *Cyperus papyrus* a été efficace pour la réduction de la DBO_5 et NO_3^- . Le *Cyperus* a présenté, par contre, le rendement le plus faible en O_2 .

- Pour les paramètres : PO_3^{-4} , NH_3^+ , NO_3^- et SO_4^{-2} ; on a remarqué que les rendements d'élimination augmentent quand les concentrations initiales de ces ions dans les eaux usées sont grandes.

- Concernant les deux paramètres : couleur et turbidité on a remarqué des fluctuations qui peuvent être liées au phénomène de dégradation des tissus morts des racines des plantes et l'évapotranspiration chez les deux espèces et au phénomène d'évaporation chez le témoin.

Cette investigation démontre que les lits filtrants sont une option fiable pour l'amélioration de la qualité des eaux usées. *Phragmites communis* et le *Cyperus papyrus* peuvent vivre et faciliter divers processus de traitement des eaux usées, alors que le *Bambusa.sp* et *Nerium oleander* n'ont pas pu résister à la condition polluée et saline.

Pour bien évaluer le potentiel d'application des macrophytes pour le traitement des eaux usées, la connaissance du développement structural, la croissance et le développement général des espèces en question sont cruciaux. Les interactions plante-microorganismes-eau usée, en fournissant des sites d'attachement microbien, le temps de séjour, la composition des eaux usées et leur type d'écoulement dans le filtre ainsi que le substrat utilisé et le choix d'un prétraitement approprié, sont aussi des paramètres qui doivent être pris en considération.