

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 dépuraction 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 dépuraction 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)

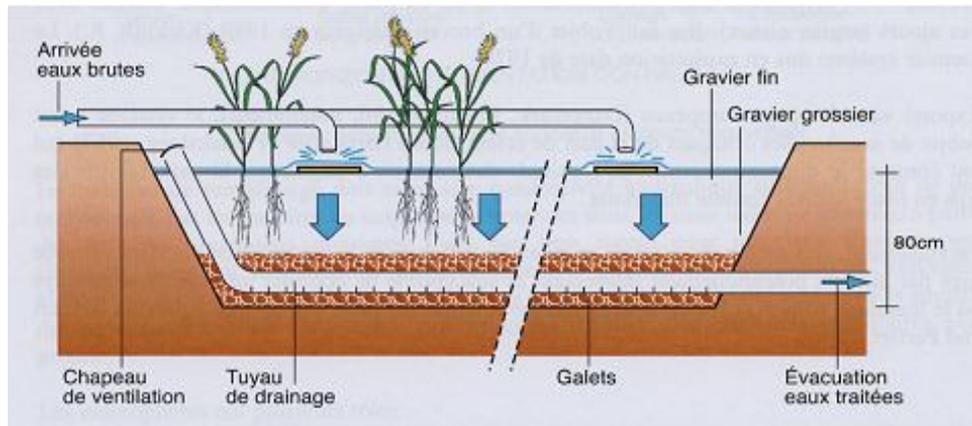


Figure 2.1 : Coupe transversale schématique d'un filtre à écoulement vertical (POULET et al, 2004).

➤ 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)

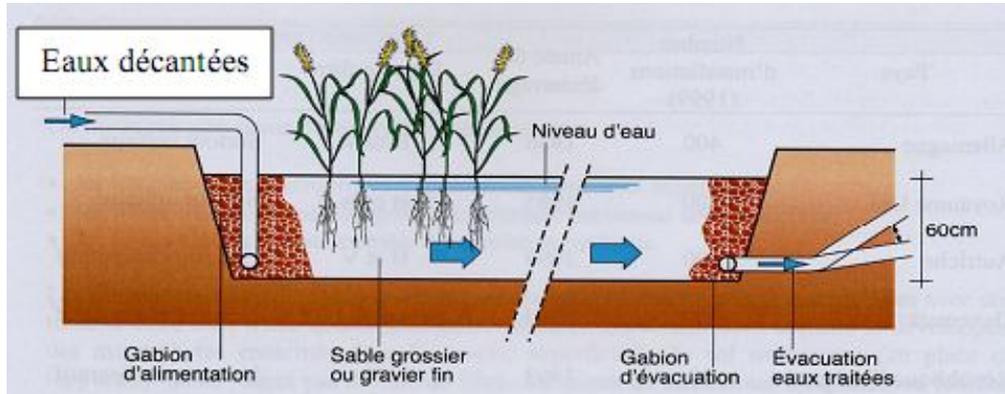


Figure 2 : Coupe transversale schématique d'un filtre à écoulement horizontal (POULET et al, 2004)

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'H₂S 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 (CO₂) 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.