

*Étude de techniques de remplacement applicables à  
l'assainissement des eaux usées de petites agglomérations*

## **Systemes de traitement des eaux usées par marais artificiels**

**Janvier 1993**

V. 3.1

# TABLE DES MATIÈRES

Page

## AVANT-PROPOS

<b>1. INTRODUCTION .....</b>	<b>1-1</b>
1.1 Mise en situation.....	1-1
1.2 But de l'étude.....	1-1
1.3 Démarche poursuivie.....	1-1
1.4 Présentation sommaire du document.....	1-2
<b>2. HISTORIQUE.....</b>	<b>2-1</b>
<b>3. ÉTAT DES CONNAISSANCES.....</b>	<b>3-1</b>
3.1 Généralités.....	3-1
3.2 Classification générale des procédés .....	3-1
3.2.1 Principales composantes des procédés de type marais artificiels.....	3-1
3.2.2 Classification des principaux procédés par marais artificiels ...	3-2
3.3 Dimensionnement et performances de certains systèmes existants.....	3-16
3.3.1 Généralités.....	3-16
3.3.2 Données disponibles.....	3-33
3.3.3 Discussions sur les performances des systèmes horizontaux sous la surface (HSS) .....	3-33
3.3.4 Discussions sur les performances des systèmes à écoulement horizontal en surface avec plantes flottantes et/ou immergées (HESF).....	3-39
3.3.5 Discussions sur les performances de systèmes à écoulement en surface avec plantes émergentes (HESE).....	3-40
3.3.6 Discussions sur les performances des systèmes hybrides .....	3-41
3.3.7 Comparaison des différents systèmes.....	3-44
3.4 Principales variables de conception et d'exploitation à considérer.....	3-45
3.4.1 Caractéristiques des eaux usées .....	3-45
3.4.2 Prétraitement .....	3-49
3.4.3 Types d'écoulement.....	3-49
3.4.4 Types de plante utilisés.....	3-51
3.4.5 Récolte des plantes.....	3-51
3.4.6 Granulométrie du média.....	3-54
3.4.7 Chaîne de traitement utilisée.....	3-55
3.4.8 Pente de la surface des unités HSS.....	3-56
3.4.9 Pente du fond des unités HSS.....	3-56
3.4.10 Épaisseur du média .....	3-56
3.4.11 Méthode d'alimentation.....	3-57
3.4.12 Contrôle de niveau à la sortie .....	3-58

3.5	Rôle des principales composantes du procédé.....	3-59
3.5.1	Les plantes.....	3-59
3.5.2	Le sol.....	3-63
3.5.3	Les micro-organismes.....	3-63
3.5.4	Le complexe plantes — sol.....	3-63
3.5.5	Le complexe plantes — micro-organismes.....	3-64
3.5.6	Le complexe sol — micro-organismes.....	3-64
3.6	Phénomènes impliqués pour l'enlèvement des contaminants.....	3-64
3.6.1	Matières en suspension (MES).....	3-64
3.6.2	Demande biochimique en oxygène (DBO).....	3-65
3.6.3	Azote (N).....	3-66
3.6.4	Phosphore (P).....	3-68
3.6.5	Micro-organismes pathogènes.....	3-71
3.6.6	Métaux lourds.....	3-72
3.7	Limitations des procédés et principaux problèmes rencontrés.....	3-72
3.7.1	Colmatage.....	3-72
3.7.2	Écoulements préférentiels.....	3-73
3.7.3	Croissance de mauvaises herbes ou difficulté de croissance des plantes.....	3-75
3.7.4	Odeurs.....	3-76
3.7.5	Insectes.....	3-76
3.7.6	Risques de propagation des plantes utilisées.....	3-77
	Références.....	3-78
<b>4.</b>	<b>POTENTIEL DES DIFFÉRENTS TYPES DE PROCÉDÉ POUR APPLICATION AU QUÉBEC.....</b>	<b>4-1</b>
4.1	Mise en situation.....	4-1
4.2	Identification des procédés à meilleurs potentiels.....	4-1
4.3	Forces et faiblesses du procédé par marais suggérées.....	4-5
4.3.1	Avantages du procédé.....	4-5
4.3.2	Inconvénients du procédé.....	4-6
4.4	Discussion.....	4-6
	Références.....	4-7
<b>5.</b>	<b>CRITÈRES DE CONCEPTION.....</b>	<b>5-1</b>
5.1	Description générale du système de traitement.....	5-1
5.2	Conception d'un étage composé d'unités verticales.....	5-6
5.2.1	Généralités.....	5-6
5.2.2	Rôle des étages à unités verticales.....	5-7
5.2.3	Principales composantes d'une unité verticale.....	5-7
5.2.4	Dimensionnement d'une unité verticale.....	5-9
5.2.5	Sélection des médias filtrants.....	5-10
5.2.6	Dimensionnement du répartiteur.....	5-11
5.2.7	Rendements escomptés.....	5-11
5.3	Conception d'un étage composé d'unités HSS.....	5-12
5.3.1	Généralités.....	5-12
5.3.2	Rôle des étages HSS.....	5-12
5.3.3	Description des principales composantes d'une unité HSS.....	5-14
5.3.4	Conception d'une unité HSS.....	5-15
5.3.5	Sélection du média filtrant.....	5-26
	Références.....	5-27

<b>6. EXEMPLE DE CONCEPTION.....</b>	<b>6-1</b>
6.1 Sélection de la chaîne de traitement.....	6-1
6.2 Dimensionnement de la fosse septique.....	6-1
6.3 Dimensionnement de l'étage vertical.....	6-2
6.4 Dimensionnement du répartiteur.....	6-3
6.5 Dimensionnement de l'étage HSS.....	6-3
<b>7. SÉLECTION DES OUVRAGES CONNEXES.....</b>	<b>7-1</b>
7.1 Imperméabilisation.....	7-1
7.2 Répartiteur.....	7-1
7.3 Équipements de contrôle de niveau.....	7-1
7.4 Conduites de contournement et trop-pleins.....	7-4
7.5 Bâtiment.....	7-5
7.6 Besoins électriques et d'automatisation.....	7-5
7.7 Ouvrages de protection et d'aménagement.....	7-5
7.8 Clôture.....	7-5
7.9 Accès.....	7-6
7.10 Besoins en eau.....	7-6
7.11 Sélection des plantes.....	7-6
7.12 Alimentation des unités verticales.....	7-6
Références.....	7-8
<b>8. CONSTRUCTION ET MISE EN SERVICE.....</b>	<b>8-1</b>
8.1 Matériaux filtrants.....	8-1
8.2 Régalage.....	8-1
8.3 Plantation des roseaux ( <i>Phragmites australis</i> ).....	8-1
Références.....	8-5
<b>9. SUIVI ET EXPLOITATION.....</b>	<b>9-1</b>
9.1 Exploitation.....	9-1
9.2 Suivi de base suggéré des équipements de traitement.....	9-1
9.2.1 Grands principes.....	9-1
9.2.2 Description des activités.....	9-2
9.2.3 Précisions sur la localisation des points de mesures de débits et d'échantillonnage ainsi que sur les méthodes utilisées.....	9-4
<b>10. ANALYSE ÉCONOMIQUE.....</b>	<b>10-1</b>
10.1 Généralités.....	10-1
10.2 Établissement des coûts d'immobilisation et d'exploitation des marais artificiels.....	10-2
10.3 Comparaison des coûts d'un système avec ou sans unités verticales..	10-3
10.4 Économies potentielles d'un système conçu avec 250 l/pers.·d ou bien de 320 l/pers.·d.....	10-4
<b>11. DISCUSSIONS ET RECOMMANDATIONS.....</b>	<b>11-1</b>
<b>12. BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>12-1</b>

---

## LISTE DES TABLEAUX

---

		Page
Tableau 2.1	Liste de certains sites existants utilisant les plantes pour le traitement des eaux usées .....	2-3 à 2-6
Tableau 3.1	Grille comparative des différents types de procédé.....	3-4 à 3-6
Tableau 3.2	Dimensionnement et performances de systèmes HSS existants.....	3-18 à 3-21
Tableau 3.3	Dimensionnement et performances de systèmes HESF existants.....	3-22 à 3-24
Tableau 3.4	Dimensionnement et performances de systèmes HESE existants .....	3-25 à 3-28
Tableau 3.5	Performances des systèmes hybrides à Oaklands Park, Angleterre .....	3-29
Tableau 3.6	Performances des systèmes hybrides à Saint-Bohaire .....	3-30
Tableau 3.7	Dimensionnement des systèmes hybrides à Oaklands Park, Angleterre.....	3-31
Tableau 3.8	Dimensionnement des systèmes hybrides à Saint-Bohaire, France.....	3-32
Tableau 3.9	Performances et charges des systèmes de traitement pour l'enlèvement des bactéries.....	3-34 et 3-35
Tableau 3.10	Synthèse des dimensionnements et performances des différents systèmes .....	3-36
Tableau 3.11	Principales variables de conception et d'opération des procédés de traitement utilisant la filtration et les plantes .....	3-46
Tableau 3.12	Principales espèces de plantes utilisées.....	3-52 et 3-53
Tableau 3.13	Fonctions des principales composantes du procédé ..	3-60
Tableau 3.14	Rôle épuratoire des différentes composantes impliquées dans le processus de traitement.....	3-61
Tableau 3.15	Taux d'enlèvement potentiel de certains éléments par un système de lenticules.....	3-62

---

**LISTE DES TABLEAUX (suite)**


---

		<b>Page</b>
Tableau 4.1	Les caractéristiques moyennes des eaux usées domestiques résidentielles aux États-Unis.....	4-2
Tableau 4.2	Comparaison des caractéristiques des eaux usées domestiques en Europe et au Québec.....	4-3
Tableau 5.1	Organigramme décisionnel de conception d'une unité HSS.....	5-20 et 5-21
Tableau 10.1	Cas typiques retenus pour l'étude comparative des coûts de marais artificiels et des étangs aérés .....	10-2
Tableau 10.2	Caractéristiques des eaux usées retenues pour l'étude comparative des coûts de marais artificiels et des étangs aérés .....	10-4
Tableau 10.3	Caractéristiques des unités formant les marais artificiels pour les 36 cas à l'étude .....	10-5
Tableau 10.4	Synthèse des coûts des systèmes de traitement.....	10-6 et 10-7
Tableau 10.5	Comparaison des différents agencements possibles de marais artificiels pour un cas typique.....	10-10
Tableau 10.6	Comparaison des coûts de différents agencements possibles de marais artificiels pour un cas typique.....	10-11

---

**LISTE DES FIGURES**


---

	<b>Page</b>
Figure 3.1	Classification des éléments de procédé ..... 3-2
Figure 3.2	Lit à écoulement sous la surface avec plantes émergentes (HSS) ..... 3-8
Figure 3.3	Système de traitement à partir de lenticules ..... 3-12
Figure 3.4	Système hybride de type "MAX PLANCK INSTITUTE PROCESS" ..... 3-14
Figure 3.5	1 <sup>er</sup> et 2 <sup>e</sup> étages d'un système du "MAX PLANCK INSTITUTE" (Seidel) ..... 3-15
Figure 3.6	Exemple d'une hiérarchisation d'écosystèmes artificiels (type Radoux) ..... 3-17
Figure 3.7	Champs de stabilité de Fe <sup>3+</sup> , Fe <sup>2+</sup> , $\alpha$ - FeOOH et Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (en pointillés de Fe (OH) <sub>3</sub> , Fe <sub>3</sub> (OH) <sub>8</sub> , et Fe(OH) <sub>2</sub> ), en fonction du potentiel d'oxydoréduction et du pH pour une activité de 10 <sup>-5</sup> mole/l ..... 3-69
Figure 3.8	Champs de stabilité des phosphates de fer et des oxyhydroxydes en absence de H <sub>2</sub> S, en fonction du potentiel d'oxydoréduction, du pH et des activités ioniques du phosphore..... 3-70
Figure 5.1	Séquence d'alimentation d'un étage verticale composé de 4 unités..... 5-2
Figure 5.2	Schéma général d'un système marais artificiel type 1 (HSS)..... 5-3
Figure 5.3	Schéma général d'un système marais artificiel type 2 (vertical + HSS)..... 5-4
Figure 5.4	Schéma général d'un système de traitement de type 3 (vertical + vertical + HSS)..... 5-5
Figure 5.5	Coupe type d'une unité verticale ..... 5-8
Figure 5.6	Coupe type d'une unité HSS ..... 5-13
Figure 5.7	Agencement général possible d'un étage HSS..... 5-19
Figure 7.1	Schéma d'installation de la membrane d'argile..... 7-2

---

**LISTE DES FIGURES (suite)**

---

		<b>Page</b>
Figure 7.2	Chambre de contrôle de niveau .....	7-3
Figure 7.3	Détail type de l'alimentation des unités verticales .....	7-7

---

## LISTE DES ANNEXES

---

Annexe I	Classement thématique des références bibliographiques
Annexe II	Résumés d'articles
Annexe III	Comptes rendus de visites d'installations et de rencontres d'experts et recueil photographique
Annexe IV	Études de cas
Annexe V	Fondements théoriques pour la conception d'une unité verticale
Annexe VI	Fondements théoriques pour la conception des unités à écoulement horizontal sous la surface (UHSS)
Annexe VII	Glossaire
Annexe VIII	Liste partielle des végétaux de marais
Annexe IX	Estimation des coûts de construction des marais artificiels

# AVANT-PROPOS

La Société québécoise d'assainissement des eaux (SQAE) a confié à Les Consultants RSA le mandat d'assister sa direction des Services techniques dans l'évaluation de technologies de remplacement applicables dans l'assainissement des eaux usées des petites agglomérations, soit plus spécifiquement l'étude et l'analyse des systèmes de traitement par marais artificiels.

La municipalité de Saint-Henri-de-Taillon au Lac-Saint-Jean a été choisie comme cas type en vue d'étudier l'applicabilité de ces procédés. Quatre autres municipalités ont ainsi été choisies pour permettre d'évaluer un ensemble de technologies appropriées aux conditions et besoins des petites agglomérations du Québec, des technologies ayant été développées et éprouvées aux États-Unis ou ailleurs dans le monde.

Le coût élevé des systèmes conventionnels se manifeste davantage à mesure que l'assainissement progresse vers des municipalités de plus en plus petites. Cet état de fait, identifié tant en Europe qu'en Amérique, a entraîné la recherche et le développement de systèmes plus économiques, plus écologiques, et aussi moins compliqués à exploiter. Le traitement des eaux usées par marais artificiels s'inscrit dans cette dernière catégorie.

Le présent document se veut un ouvrage de référence pour les concepteurs et exploitants d'ouvrages d'assainissement municipaux qui désirent s'initier au traitement des eaux usées selon les technologies d'épuration par marais artificiels. Il ne constitue pas un recueil de normes ou de directives mais bien une synthèse des plus récents développements sur le sujet.

La démarche adoptée pour la réalisation de cette étude a débuté par une recherche bibliographique sur le sujet et s'est poursuivie par des échanges et des rencontres d'experts ainsi que des visites d'installations existantes, le tout visant une connaissance plus approfondie des technologies et de leurs limites d'application pour les petites agglomérations. C'est ainsi que des critères de dimensionnement et d'application jugés sécuritaires ont pu être proposés. Cependant, compte tenu des caractéristiques de nos eaux usées ainsi que du contexte climatique particulier du Québec, ces critères sont appelés à évoluer au fur et à mesure que des applications concrètes auront été réalisées.

Notre étude est le résultat d'une étroite collaboration avec la direction des Services techniques de la Société québécoise d'assainissement des eaux dont les commentaires et suggestions, de même que ceux de la direction de l'Assainissement urbain du ministère de l'Environnement du Québec, ont contribué à la qualité du produit fini. Nous tenons à remercier Raymond Auger et Serge Rouleau de la Société québécoise d'assainissement des eaux et Serge Hamel et Gilles Marchand du ministère de l'Environnement du Québec pour leurs supports et commentaires judicieux.

Nous tenons à souligner également la contribution des personnes suivantes qui ont répondu avec attention à nos nombreuses questions:

- **Hans Brix**, botaniste, Botanical Institute, Aarhus University, Nordlandsvej 68, Danemark.
- **Paul Cooper**, B. Tech. M. Sc., Water Research Centre (WRC) Swindon, Wiltshire, Angleterre.

- **Dirk Esser**, Société d'ingénierie Nature & Technique, Lyon, France.
- **Gunther Geller**, ingénieur, Okolog-ingenieurbüro, Alpenstrasse 13, 8900 Augsburg, Allemagne.
- **Ben Green**, B.SC C.biol. M.I. biol Miuwem, F.R.E.S., Severn Trent Water-Finham reclamations Works, Coventry, Angleterre.
- **Donald A. Hammer D.A.**, Tennessee Valley Authority, Valley Ressource Center, États-Unis.
- **Alain Liénard**, CEMAGREF (Centre National du Machinisme Agricole du Génie Rural des Eaux et des Forêts), Lyon, France.
- **Jean-Pierre Mettetal**, Service Régional Aménagement des eaux, Besançon, Cedex
- **Michael Ogden**, Southwest Wetlands group, Santa Fe, États-Unis.
- **Michel Radoux**, agronome, Fondation Universitaire Luxembourgeoise, Arlon, Belgique.
- **Hans Bertil Wittgren**, Ph. D., Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Norrköping, Suède.

L'équipe de recherche chez Les Consultants RSA était composée de:

- **Réjean Villeneuve**, ingénieur, chargé de projet.
- **Claude Villeneuve**, biologiste, chercheur.
- **Marc Bouchard**, ingénieur, chercheur.
- **Patrice Maltais**, informaticien, traitement des données et modélisation mathématique.
- **Francine Pedneault**, secrétaire.
- **Lili Tremblay**, secrétaire.

Soulignons également que la mention dans le texte de marques de commerce ou de produits commercialisés ne constitue en aucune façon une recommandation d'employer lesdits produits; de plus, certains de ces produits et procédés font l'objet de brevets qui sont la propriété de manufacturiers, de fournisseurs ou de concepteurs qui en détiennent les droits exclusifs.

## 1. INTRODUCTION

### 1.1 Mise en situation

Les systèmes de traitement d'eaux usées utilisant des plantes existent depuis plus d'un siècle. Ce type de procédé est devenu plus populaire au début des années 1980 alors que les spécialistes de différents pays essayaient de développer des procédés bien adaptés aux petites municipalités et aux industries isolées. Ces procédés devaient globalement être conformes aux critères suivants:

- être moins coûteux à construire et à exploiter que les systèmes conventionnels;
- nécessiter peu d'équipements mécanisés;
- consommer peu d'énergie.

L'usage de marais artificiels ou naturels permettrait de satisfaire plusieurs de ces critères et ce type de procédé a connu un essor considérable durant les dix dernières années.

### 1.2 But de l'étude

La présente étude a comme objectifs:

- de réaliser un inventaire des différents procédés qui utilisent les plantes existant un peu partout dans le monde;
- de réaliser une revue bibliographique qui permettra de traiter des différentes expériences réalisées et de l'efficacité des systèmes, d'établir les bases de conception des types de procédé utilisés, de comprendre plus à fond les mécanismes impliqués et de discuter des avantages et inconvénients de chacun d'eux;
- d'évaluer les possibilités d'application de certains d'entre eux au Québec et d'établir les rendements prévisibles;
- de définir les critères de conception, de construction et d'exploitation pouvant être appliqués au Québec;
- d'évaluer les avantages coûts/bénéfices de tels systèmes de traitement.

### 1.3 Démarche poursuivie

Plusieurs experts reconnus furent rencontrés à l'automne 1991 dans le cadre d'une visite d'installations en Europe et aux États-Unis. Les résultats de ces démarches sont discutés à l'annexe III du présent document. Une revue bibliographique a permis d'établir l'état des connaissances dans ce domaine. Les références bibliographiques d'intérêt furent classées sous différents thèmes et sont présentées à l'annexe I. Le résumé des articles et documents les plus importants peut être consulté à l'annexe II. Des études de certains

cas tirés de la littérature ont permis de compléter le tableau d'ensemble et sont présentées à l'annexe IV.

Les procédés qui semblent les plus prometteurs pour une application en milieu québécois ont été choisis et des recommandations relatives à leur conception et leur construction ont été développées.

#### **1.4 Présentation sommaire du document**

Le chapitre 2 présente un historique sommaire de l'évolution du procédé et des principales avenues possibles.

Le chapitre 3 fournit une synthèse de l'information recueillie lors des lectures, rencontres et visites. Une classification générale des différents types de procédé et des éléments qui les composent est proposée. Par la suite, les différentes variables qui peuvent affecter la conception et l'exploitation sont discutées. Les critères de conception développés jusqu'à maintenant ainsi que les rendements obtenus des systèmes en exploitation sont présentés. Les phénomènes impliqués dans le processus d'épuration des marais sont très complexes et la littérature comporte une multitude de discussions à ce sujet. Les parties 3.5 et 3.6 traitent de ces aspects.

Finalement, il est traité des principaux problèmes d'exploitation et de conception pouvant survenir.

Le chapitre 4 délibère sur le potentiel des différents procédés et suggère ceux qui semblent offrir un meilleur potentiel pour une application dans les conditions québécoises. Il est important de préciser ici que cette suggestion n'élimine en rien d'autres procédés qui pourraient être applicables mais présente plutôt les avenues les plus prometteuses compte tenu de l'état actuel des connaissances.

Les critères de conception des systèmes retenus sont présentés sommairement au chapitre 5 tandis que les annexes V et VI débattent plus en profondeur des fondements théoriques et des hypothèses retenues lors de l'élaboration de ces critères. Le chapitre 6 analyse sommairement les différents aspects à considérer pour choisir le site de traitement. Le chapitre 7 traite des différents ouvrages connexes nécessaires au procédé. Les clauses particulières à insérer au devis, les attentions spéciales lors des travaux ainsi que les principales activités de démarrage et de mise en service sont présentées au chapitre 8. Dans le chapitre 9, on présente les différentes contraintes d'exploitation.

Une analyse économique sommaire fut réalisée afin d'établir les coûts des marais artificiels. Ces résultats sont présentés au chapitre 10.

Finalement, des discussions générales sont entreprises sur les limites des systèmes, leurs avantages et inconvénients ainsi que les aspects qui nécessiteraient des études complémentaires.

Compte tenu de la nature technique et biologique des recherches effectuées et afin d'aider le lecteur dans la compréhension générale du document, un

glossaire des principaux termes reliés au domaine de la biologie et du traitement des eaux usées est joint à l'annexe VII.

## 2. HISTORIQUE

L'usage des marais pour recevoir les eaux usées remonte au début du siècle. Les marais, les marécages et les tourbières étaient perçus comme des milieux récepteurs d'eaux usées, mais jouaient tout de même un rôle épuratoire non négligeable. Les premières notions scientifiques relatives à l'usage des marais pour le traitement des eaux usées remontent aux environs de 1946 avec Seidel (Radoux, M., 1989). Le procédé développé par Seidel, aussi appelé "Max Planck Institute System (MPIS)" ou "Krefeld Process", comporte plusieurs étages successifs. Les plantes généralement utilisées sont le phragmite (*Phragmites australis*), le scirpe (*Scirpus sp.*), l'iris (*Iris sp.*) et la quenouille (*Typha sp.*).

Kickuth a développé en Allemagne, depuis 1964, un procédé de traitement à écoulement horizontal sous la surface. Ce procédé utilise surtout le roseau commun (*Phragmites australis*) mais peut aussi comprendre, pour certaines applications particulières, le jonc (*Juncus sp.*), le scirpe (*Scirpus sp.*), l'iris des marais (*Iris pseudacorus*) ou la menthe d'eau (*Mentha aquatica*). Une première installation de ce type fut implantée à Othfresen en 1974. Kickuth et ses associés ont réalisé plusieurs autres applications tant municipales qu'industrielles, entre autres dans le domaine des textiles, des brasseries et des laiteries.

L'usage des marais pour le traitement des eaux usées aux États-Unis a surtout débuté en aménageant des marais déjà existants. Par la suite, certaines applications furent réalisées à partir de marais artificiels, dans la majorité des cas avec écoulement en surface, et les plantes utilisées le plus fréquemment sont les jacinthes d'eau (*Eichornia crassipes*) et les lenticules (*Lemna sp.*).

L'intérêt pour ce type de traitement s'est intensifié durant la période de 1980 à 1990 et plusieurs installations ont vu le jour un peu partout en Europe et en Amérique du Nord. Le tableau 2.1 fournit une liste de certains sites existants et permet de constater la multitude de systèmes implantés durant cette période, principalement au Danemark et en Angleterre. Plus de cent trente installations furent mises en exploitation entre 1984 et 1990 au Danemark pour le traitement secondaire de petites collectivités (Schierup et al, 1990 b). La majorité de ces installations opèrent à écoulement sous la surface et utilisent le roseau commun (*Phragmites australis*). Les installations anglaises sont en général du même type et, dans l'ensemble, utilisées pour le traitement secondaire des eaux usées. En France, quelques installations expérimentales sont suivies de près depuis 3 à 4 ans. Elles sont conçues sur plusieurs étages avec des éléments à écoulement vertical dans le sol, d'autres à écoulement horizontal sous la surface et, dans certains cas, un dernier étage en écoulement en surface. Il s'agit d'une version modifiée du procédé développé par Seidel.

Des expériences réalisées par la Tennessee Valley Authority, États-Unis, visent à développer un procédé à écoulement sous la surface pour les résidences isolées et les très petites collectivités (Kadlec, R.H. et al, 1991).

L'avènement de plusieurs conférences d'envergure internationale spécifiques au traitement des eaux usées par les marais démontre l'intérêt grandissant de la communauté scientifique et du milieu. En effet, une première conférence a eu lieu en 1988 à Chatanooga, Tennessee, États-Unis, une seconde en 1990 à Cambridge, Angleterre, et une autre à l'automne 1991 à Pensacola, Floride.

La technologie et les méthodes de conception ont connu un essor important durant les dernières années et les travaux en cours, un peu partout dans le monde, devraient permettre d'établir des principes de conception et des bases théoriques fondamentales reconnues durant les prochaines années.

TABLEAU 2.1

**LISTE DE CERTAINS SITES EXISTANTS UTILISANT LES PLANTES  
POUR LE TRAITEMENT DES EAUX USÉES**

MUNICIPALITÉ	PAYS	POPULATION ÉQUIVALENTE	ANNÉE D'ENTRÉE EN SERVICE	NIVEAU DE TRAITEMENT (TRAITEMENT AVANT LES OUVRAGES)
<b>1. SYSTÈMES À ÉCOULEMENT SOUS LE SOL</b>				
A. Lund Thomsen, Vedebaek	Danemark	—	—	—
Acle, Anglian	Angleterre	1 260	octobre-1985	Secondaire (eaux usées brutes tamisées)
Arcata, Californie	E.U.	—	1979	Tertiaire (effluents d'étangs aérés + désinfection)
Arnå Mejeri, Løgumkloster	Danemark	—	1987	—
Astrup Gods, Bjergsted	Danemark	10	1988	—
Audlem, North-West	Angleterre	—	avril-1987	Secondaire (eaux usées brutes)
Barner, Nibe	Danemark	250	1986	—
Borum	Danemark	500	1987	—
Borup, Viborg	Danemark	200	1984	—
Bracknell, Thames	Angleterre	N.A.	mai-1987	Boues (lits de séchage de boues)
Branderup, Nørre Rangstrup	Danemark	500	1985	—
Bredballegård	Danemark	36	1984	—
Brøndum, Hobro	Danemark	144	1986	—
Camphill Village	Angleterre	300	1988	Secondaire
Castle Roe, DOE	Angleterre	25	mars-1987	Secondaire (eaux usées décantées)
Chalton, Anglian	Angleterre	200	mai-1987	Secondaire (eaux usées brutes tamisées)
Daka a.m.b.a., Hedensted	Danemark	1 820	1984	—
Dansk Oliegenbrug, Kalundborg	Danemark	—	1988	—
Daugbjerg	Danemark	250	1986	—
Dons, Kolding	Danemark	100	1986	—
East Haddow, Anglian	Angleterre	550	avril-1987	Secondaire (eaux usées brutes tamisées)
Egebaek-Hviding, Ribe	Danemark	1 500	1986	—
Egense, Sejlfjord	Danemark	—	1986	—
Egeskov, Fredericia	Danemark	1 200	1984	—
Emmitsburg, Maryland	E.U.	—	1984	Tertiaire (effluent d'un filtre biologique "Trickling Filter")
Fabius Coal Preparation Plant, Jackson County, Alabama	E.U.	—	1985	Tertiaire (effluents d'étangs aérés + désinfection)
Fåre	Danemark	100	1987	—
Ferring, Lemvig	Danemark	500	1984	—
Fjaltring	Danemark	300	1987	—
Fjølstervang, Videbaek	Danemark	740	1987	—
Fousing, Struer	Danemark	200	1984	—
Føvling Deponi, Holsted	Danemark	—	1986	—
Frøstrup, Hanstholm	Danemark	700	1985	—
Gerneswang	Allemagne	±500	1989	Secondaire
Gimming, Randers	Danemark	250	1985	—
Gravesend, Southern	Angleterre	1 000	avril/juin 1986	Secondaire/Lixiviat de boues (eaux usées brutes/eaux usées décantées)
Gudum, Lemvig	Danemark	413	1985	—
Gustine, Californie	E.U.	—	1984	Tertiaire (effluents d'étangs aérés)
Håls	Danemark	120	1988	—
Hammelev, Grenaa	Danemark	225	1987	—
Hjembaek, Svinninge	Danemark	300	1987	—
Hjordkaer, Rødekro	Danemark	600	1984	—
Højbjerg	Danemark	—	1987	—
Holtby, Yorkshire	Angleterre	130	juin-1986	Secondaire (eaux usées brutes tamisées)
Homa	Danemark	190	1987	—

TABLEAU 2.1

**LISTE DE CERTAINS SITES EXISTANTS UTILISANT LES PLANTES  
POUR LE TRAITEMENT DES EAUX USÉES**

MUNICIPALITÉ	PAYS	POPULATION ÉQUIVALENTE	ANNÉE D'ENTRÉE EN SERVICE	NIVEAU DE TRAITEMENT (TRAITEMENT AVANT LES OUVRAGES)
Iglse	Danemark	100	1986	—
Jaungyde, Ry	Danemark	125	1985	—
K. Brandt, Søgården, Møldrup	Danemark	25	1986	—
Kalø Landbrugsskole, Rønde	Danemark	220	1984	—
Kamme Langberg, Hadsten	Danemark	5	1989	—
Karlebogård, Karlebo	Danemark	75	1988	—
Karstoft, Aaskov	Danemark	120	1985	—
Kells, DOE	Angleterre	N.A.	avril-1987	Boues (lits de séchage de boues)
Kielstrup	Danemark	—	1986	—
Kingstone and Madley, Welsh	Angleterre	1 200	mai-1987	Secondaire (eaux usées décantées/eaux usées brutes tamisées)
Kirmington, Anglian	Angleterre	550	octobre-1986	Secondaire (eaux usées brutes tamisées)
Knudby	Danemark	65	1984	—
Kolinsund Efterskole, Midtdjurs	Danemark	50	1986	—
Lallaing	France	15 000	1992	Secondaire
Lånnum	Danemark	150	1987	—
Lille Arden, Arden	Danemark	—	1985	—
Lindemarkvej, Bjaeverskov, Skovbo	Danemark	150	1986	—
Listowell, Ontario	Canada	—	1980	(variable)
Little Stretton, Severn-Trent	Angleterre	60	juillet-1987	Secondaire (effluent fosse septique)
Lumsås, Trundholm	Danemark	350	1988	—
Lunderskov, Lunderskov	Danemark	15 — 20	1984	—
Lustleigh, Southwest	Angleterre	470	septembre-1987	Secondaire (eaux usées brutes)
Lyngby	Danemark	580	1987	—
M. Jonassen, Sydthy	Danemark	6	1985	—
Mandø	Danemark	325	1987	—
Marnhull, Wessex	Angleterre	375	juillet-1986	Secondaire (eaux usées brutes tamisées/eaux usées décantées)
Middleton, Severn-Trent	Angleterre	—	mai-1987	Tertiaire (effluent filtre biologique)
Moegård Museum, Århus	Danemark	180	1983	—
N. Jyllands amtsvejvaesen, Dronninglund	Danemark	10	1986	—
Nordby, Samsø	Danemark	2 000	1988	—
Nun Monkton, Yorkshire	Angleterre	160	avril-1987	Secondaire (eaux usées brutes/eaux usées décantées)
O. Skouse Elsborg, Bjerringbro	Danemark	4	1987	—
Ødsted Mejeri, Egtved	Danemark	—	—	—
Ormslev	Danemark	350	1986	—
Østerby	Danemark	100	1988	—
P. Hansen Helsingør,	Danemark	5	1988	—
P.B. Olesen, Bindslev, Hirtshals	Danemark	—	—	—
Pajbjergfonden Dyngby, Odder	Danemark	—	1987	—
Panessière	France	±500	1987	Secondaire (Aucun)
Pia Plet	Danemark	5	1988	—
Plejhjemmet, Attruphøj	Danemark	130	1985	—
R. Høst Hejnsvig, Grindsted	Danemark	46	1987	—
Ringsted, Ringsted	Danemark	—	1984	—
Rorup, Løje	Danemark	100	1989	—
Rosmus Skole	Danemark	100	1987	—
Rosmus, Ebeltoft	Danemark	100	1987	—

TABLEAU 2.1

**LISTE DE CERTAINS SITES EXISTANTS UTILISANT LES PLANTES  
POUR LE TRAITEMENT DES EAUX USÉES**

MUNICIPALITÉ	PAYS	POPULATION ÉQUIVALENTE	ANNÉE D'ENTRÉE EN SERVICE	NIVEAU DE TRAITEMENT (TRAITEMENT AVANT LES OUVRAGES)
Rudbøl, Højer	Danemark	125	1986	—
Rugballegård, Vejle	Danemark	4 — 6	1984	—
Rugeley, Arm/B'Ham, Univ.	Angleterre	—	novembre-1986	Secondaire (effluent fosse septique)
S. Vestergård, Insgrub	Danemark	5 — 4	1984	—
Sabro	Danemark	2 000	1986	—
Salten Skov, Them	Danemark	70	1987	—
Samsø Konserver	Danemark	—	1987	—
Santee, Californie	E.U.	—	—	—
Sdr. Thise, Sundsøre	Danemark	120	1985	—
Sejerslev, Morsø	Danemark	1 500	1985	—
Sidney	Australie	—	—	—
Skalds, Møldrup	Danemark	—	1985	—
St-Pauls Walden, Thames	Angleterre	50	novembre-1985	Secondaire (eaux usées brutes)
Standon, Thames	Angleterre	N.A.	mai-1987	Boues (lits de séchage de boues)
Stoholm, Fjends	Danemark	6 000	1985	—
Store Binnerup, Nørager	Danemark	120	1985	—
Stormy Down, Welsh	Angleterre	200	octobre-1986	Secondaire (eaux usées brutes tamisées)
Strandelhjørn	Danemark	135	1989	—
Sundby, Thisted	Danemark	490	1986	—
Svenstrup, Hammel	Danemark	250	1986	—
Thise	Danemark	140	1985	—
Tjele Camping, Tjele	Danemark	200	1987	—
Tjele Gods	Danemark	50	1987	—
Uggerhalne, Ålborg	Danemark	400	1985	—
Ukendt	Danemark	—	—	—
Ukendt	Danemark	—	—	—
Ukendt, Ballerup	Danemark	—	—	—
Ukendt, Erøkebøing	Danemark	—	—	—
Ukendt, Fakse	Danemark	—	—	—
Ukendt, Jaegerspris	Danemark	—	—	—
Ukendt, Rønnede	Danemark	—	—	—
Ukendt, Roskilde	Danemark	—	—	—
Ukendte, Aars	Danemark	—	—	—
Ukendte, Billund	Danemark	—	—	—
Ukendte, Jernløse	Danemark	—	—	—
Valleyfield, Fife R.C.	Angleterre	60	avril-1987	Secondaire (eaux usées brutes tamisées)
Valsted	Danemark	650	1986	—
Virket, Stubbekøbing	Danemark	110	1985	—
Vogn	Danemark	7 100	1987	—
Vrads	Danemark	200	1987	—
Vrads Sande Feriecenter	Danemark	—	1989	—
Wefri A/S, Pøt Mølle	Danemark	—	1986	—
West Buckland, Southwest	Angleterre	180	mars-1987	Tertiaire (effluent final)
Westow, Yorkshire	Angleterre	220	avril-1987	Secondaire (eaux usées décantées)
Windsor, Thames	Angleterre	—	mai-1987	Secondaire/boues (eaux usées brutes/lits de séchage de boues)
±30 municipalités	Angleterre	400 à 2 000	1985 à 1991	Secondaire et tertiaire

**LISTE DE CERTAINS SITES EXISTANTS UTILISANT LES PLANTES  
POUR LE TRAITEMENT DES EAUX USÉES**

MUNICIPALITÉ	PAYS	POPULATION ÉQUIVALENTE	ANNÉE D'ENTRÉE EN SERVICE	NIVEAU DE TRAITEMENT (TRAITEMENT AVANT LES OUVRAGES)
<b>2. SYSTÈMES À ÉCOULEMENT EN SURFACE</b>				
<b>2.1 Sans effluent en surface</b>				
Arcata, Californie	E.U.	---	---	Tertiaire (effluent étangs aérés)
Austin, Texas	E.U.	---	1976	Secondaire - Avec jacinthes d'eau*
Bay St-Louis, Massachusetts	E.U.	---	1976	Secondaire - Avec lentilles d'eau et "Pennywort"
Collins, Massachusetts	E.U.	---	---	Tertiaire (effluent étangs facultatifs)
Disney World, Florida	E.U.	---	---	Avec jacinthes d'eau*
Lakeland, Floride	E.U.	---	1977	Tertiaire - Avec jacinthes d'eau*
N. Biloxi, Massachusetts	E.U.	---	1979	Secondaire - Avec lentilles d'eau*
NSTL, Massachusetts	E.U.	---	---	Avec lentilles d'eau* et "Pennywort" (effluent plan d'emballage)
Orlando, Floride	E.U.	---	1985	Tertiaire - Avec jacinthes d'eau*
San Benito, Texas	E.U.	---	1976	Secondaire - Avec jacinthes d'eau*
San Diego, Californie	E.U.	---	1981	Secondaire avancée - Avec jacinthes d'eau*
Steep Eye	E.U.	---	---	Tertiaire (effluent étangs facultatifs)
Wilton, Arizona	E.U.	---	---	Tertiaire (effluent étangs facultatifs)
<b>2.2 Avec effluent en surface</b>				
Arcata, Californie	E.U.	---	1979	Tertiaire (effluents d'étangs aérés + désinfection)
Fabius Coal Preparation Plant, Jackson County, Alabama	E.U.	---	1985	Tertiaire (effluents d'étangs aérés + désinfection)
Gustine, Californie	E.U.	---	1984	Tertiaire (effluents d'étangs aérés)
Listowell, Ontario	Canada	---	1980	(Variable)
<b>3. MARÉCAGES (INSTALLATIONS AVEC SITES NATURELS)</b>				
Bellaire, Michigan	E.U.	---	---	Tourbière**
Brillon Marsh, Wisconsin	E.U.	---	---	Marais**
Concord, Massachusetts	E.U.	---	---	Marais**
Coots Paradise, Town of Dundas, Ontario	Canada	---	---	Marais**
Houghton Lake, Michigan	E.U.	---	---	Tourbière**
Whitney Mobile Park, Home Park, Floride	E.U.	---	---	Dôme de Cyprés**
Wildwood, Floride	E.U.	---	---	Marécage**

\* Plantes aquatiques utilisées

\*\*Nature du site naturel

### 3. ÉTAT DES CONNAISSANCES

#### 3.1 Généralités

Ce chapitre traite de l'ensemble de l'information recueillie lors des visites d'installations, des rencontres avec les experts et de la revue de littérature. Les données ont été regroupées sous les différents thèmes suivants:

- une classification générale des types de procédé existants et la présentation des principales configurations rencontrées;
- les différents critères de conception appliqués ainsi que les rendements obtenus;
- les principales variables pouvant influencer la conception, l'exploitation et le rendement des systèmes;
- les différents phénomènes impliqués dans les procédés dont, entre autres, le rôle joué par les principales composantes et les facteurs biologiques et chimiques permettant d'assurer l'activité épuratoire des systèmes.

Finalement, les limites et les différents problèmes rencontrés lors de l'exploitation de ces systèmes seront discutés.

#### 3.2 Classification générale des procédés

Les procédés ayant fait l'objet d'une analyse dans le cadre de cette étude sont ceux qui utilisent les plantes de marais de façon naturelle ou artificielle. L'écoulement peut être en surface ou au travers du sol. Les procédés sous serre ou à infiltration de type épandage souterrain ou lits percolants dans lesquels il n'y a pas de plante sont exclus. Les procédés à épandage sous faible charge n'ont pas été traités. L'étude fut concentrée sur des procédés qui permettent normalement d'utiliser des surfaces de terrain relativement petites, comparativement à des procédés qui se limitent à épandre des eaux usées sur des terrains existants.

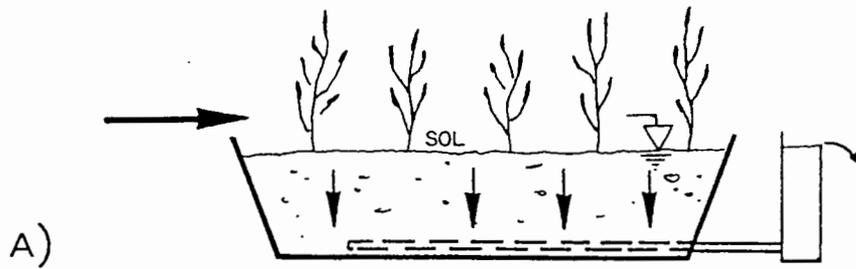
##### 3.2.1 Principales composantes des procédés de type marais artificiels

Il existe une multitude de variantes de procédé de traitement à l'aide de marais dont plusieurs sont relativement semblables. Il est possible de subdiviser les procédés en différentes composantes. Si on classe ces composantes à partir du type d'écoulement, il est possible de les regrouper en trois catégories. La figure 3.1 présente une vue schématique de chacun de ces éléments de procédé.

Le premier est l'unité à écoulement vertical. Les eaux usées sont acheminées à la surface de ces unités et elles percolent de façon verticale au travers du média filtrant jusqu'au fond où une série de conduites récoltent les eaux traitées. Elles sont souvent alimentées de façon intermittente et l'écoulement est normalement en milieu non saturé.

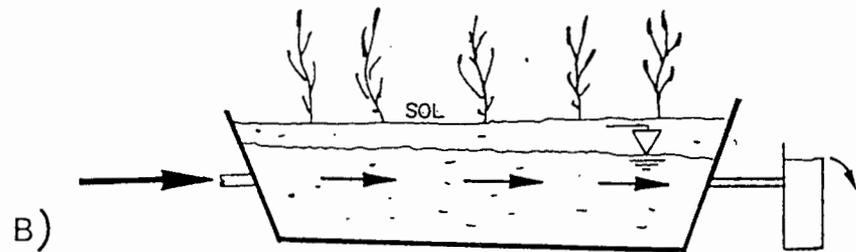
FIGURE 3.1

**CLASSIFICATION DES ÉLÉMENTS DE PROCÉDÉ**



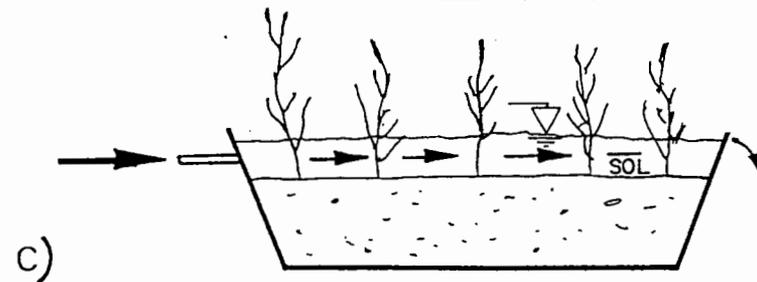
A)

Unité à écoulement Vertical  
Type 1- (V)



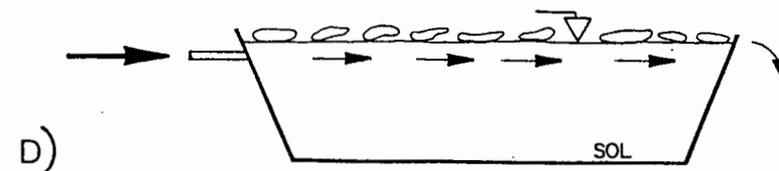
B)

Unité à écoulement Horizontal Sous la Surface.  
Type 2- (HSS)



C)

Unité à écoulement Horizontal En Surface avec plantes Émergentes  
Type 3- (HESE)



D)

Unité à écoulement Horizontal En Surface avec plantes Flottantes  
Type 4- (HESF)

Le second type d'unité est celui à écoulement horizontal sous la surface. L'affluent est acheminé à une extrémité du lit planté et les eaux usées s'écoulent sous la surface ou très près de cette dernière de façon horizontale pour être captées à l'autre extrémité du lit.

Le troisième type d'écoulement est horizontal en surface et regroupe les marais naturels et artificiels où aucun média filtrant n'est utilisé. L'eau usée s'écoule en surface dans des canaux plus ou moins allongés ou des lagunes, le tout tel que montré aux parties C et D de la figure 3.1. Ce type d'unité peut être divisé en deux sous-catégories, compte tenu des espèces de plantes utilisées. Un premier groupe comprend principalement des plantes émergentes telles que la quenouille (*Typha sp.*), le roseau commun (*Phragmites australis*), le jonc (*Juncus sp.*) et dont le niveau d'eau varie généralement entre 100 et 500 mm tandis que le second groupe est composé de plantes flottantes telles que la lenticule (*Lemna sp.*) et la jacinthe d'eau (*Eichornia crassipes*) dont les niveaux d'eau varient plutôt de 600 mm à 1 m.

Tous les procédés sont composés d'un regroupement en série ou en parallèle d'une ou plusieurs de ces unités.

### 3.2.2 Classification des principaux procédés par marais artificiels

Les principaux procédés de traitement peuvent être subdivisés en trois branches principales. Le premier groupe, qui est le plus commun, comprend tous les systèmes composés d'un seul type d'unité à écoulement horizontal sous la surface. Le deuxième type regroupe tous les systèmes qui comportent des unités à écoulement en surface. Le troisième groupe inclut tous les systèmes hybrides qui sont composés de plusieurs étages d'unités de traitement différents, incluant des unités à écoulement vertical. Voici une description sommaire de chacun des procédés.

#### **A. Systèmes à écoulement horizontal sous la surface avec plantes émergentes (HSS)**

Ce type de procédé fut introduit en 1964 par Kickuth en Allemagne. Un premier système fut mis en exploitation à Othfresen en 1974 (Kickuth, R., 1990). Les principales caractéristiques de ce procédé sont présentées à la partie A du tableau 3.1. Celui-ci utilise un mélange de sol organique, de sable et d'argile dont la perméabilité est relativement faible. Ce mélange est sélectionné afin de favoriser la croissance des plantes et d'augmenter la capacité d'adsorption du sol en vue principalement d'enlever le phosphore. La capacité hydraulique est maintenue par le réseau de racines et de rhizomes des plantes qui croissent et qui meurent. Selon Kickuth, le développement des plantes permet d'obtenir, après 3 ans, une perméabilité de l'ordre de  $1 \times 10^{-1}$  à  $9 \times 10^{-1}$  cm/s, quel que soit le type de sol retenu.

TABLEAU 3.1

GRILLE COMPARATIVE DES DIFFÉRENTS TYPES DE PROCÉDÉ

A) Lit à écoulement horizontal sous la surface avec plantes émergentes (HSS)

VARIANTES	PRÉTRAITEMENT	TYPE DE SOL	TYPE DE PLANTES	TYPE D'ALIMENTATION	NIVEAU DE LA NAPPE PHRÉATIQUE PAR RAPPORT AU SOL	RÉCOLTE DES PLANTES	CONTROLE DE NIVEAU À LA SORTIE	REMARQUES
Kickuth	Dégrillage	— Mélange de sol organique, de sable et d'argile  — Perméabilité relativement faible $K < 10^{-5}$ m/s	— Presque exclusivement le roseau commun pour les applications municipales  — Pour d'autres applications, certaines autres plantes sont envisagées; jonc, scirpe, iris des marais, menthe d'eau	Continu	Près de la surface et en surface	Aucune	Oui	— Brevet américain 1989 (Kickuth, R.)  — Études de Hans Brix au Danemark sur ce type de procédé (Kickuth, R., 1989) (Brix, H., 1987 a)
Geller	Bassin de sédimentation	Sable avec 5 @ 10% d'argile	— Roseau commun	Par fournée	Légèrement sous la surface	Aucune	Oui	— (Geller, G. et al, 1990 a)
Cooper (WRC)	Dégrillage < 6 mm et sédimentation	Petit gravier avec angles doux	— Roseau commun	Continu	Sous le sol	Aucune	Non	— (Cooper, P. F., 1990 a)

N.B.: Tous les systèmes artificiels doivent être entourés d'une membrane imperméable afin d'éviter une perte d'eaux usées trop importante par infiltration dans le sol.

TABLEAU 3.1

**GRILLE COMPARATIVE DES DIFFÉRENTS TYPES DE PROCÉDÉ (suite)**

**B) Lit à écoulement en surface (HES)**

VARIANTES	PRÉTRAITEMENT	TYPE DE PLANTES	ÉPAISSEUR D'EAU (m)	RÉCOLTE DES PLANTES	REMARQUES
Marais artificiels à plantes aquatiques flottantes (HESF)	Lagunage	Lenticules, jacinthes d'eau	0,3 @ 1	Lenticules • Oui Jacinthes d'eau • Non	Surtout utilisé en traitement tertiaire (W.P.C.F., 1990) (Lemna Corporation, 1991)
Marais naturels	Traitement secondaire	Différentes espèces de plantes de marais	Variable	Non	L'usage de marais ou tourbières existantes est très spécifique à chacun des sites (W.P.C.F., 1990)
Marais à écoulement en surface avec émergentes (HESE)	Dégrillage, décantation	Quenouilles, joncs et roseau commun	0,2 @ 0,4	Non	(W.P.C.F., 1990) (Radoux, M. et al, 1990 b)

**N.B.:** Tous les systèmes artificiels doivent être entourés d'une membrane Imperméable afin d'éviter une perte d'eaux usées trop importante par infiltration dans le sol.

TABLEAU 3.1

GRILLE COMPARATIVE DES DIFFÉRENTS TYPES DE PROCÉDÉ (suite)

C) Systèmes hybrides (à plusieurs étages)

VARIANTES	NOMBRE D'ÉTAGES	NUMERO D'ETAGE	MÉTHODE D'ALIMENTATION	TYPE D'ÉCOULEMENT	TYPE DE SOL	TYPE DE PLANTES	PRÉTRAITEMENT	REMARQUES
Max Plank Institute Process (Krefeld)	4 ou 5	1	Intermittente	Vertical	Gravier	Phragmites australis Glyceria aquatica	Aucun ou fosse septique	(Seidel, K. 1983)
		2	Intermittente	Vertical	Gravier	Phragmites australis Glyceria aquatica		(Cooper. P. F., 1987) (Mettetal, J.P. et al, 1990) (Boutin, C., 1987)
		3 et 4	Continu	Horizontal sous la surface	Sable	Scirpus Iris Schoenoplectus Sparganium Carex Typha Acorus		
		5	Continu	Horizontal en surface				
Radoux	3	1	Continu	HES		Typha	Bassin de sédimentation (lagunage)	(Fondation universitaire luxembourgeoise)
		2	Continu	Vertical	Sable et gravier	Arbres		
		3	Continu	HES			Typha et autres	

N.B.: Tous les systèmes artificiels doivent être entourés d'une membrane imperméable afin d'éviter une perte d'eaux usées trop importante par infiltration dans le sol.

Certaines expériences réalisées par Kickuth ont donné les résultats suivants:

Nature du sol	Perméabilité	
	A l'origine	Après 3 ans d'activité de <i>Phragmites communis</i>
Sable argileux	$4 \times 10^{-4}$ cm/s	$1 \times 10^{-1}$ cm/s
Argile	$2 \times 10^{-6}$ cm/s	$8,5 \times 10^{-1}$ cm/s

(Kickuth, R.)

Kickuth considère qu'une partie de l'écoulement des eaux usées peut se faire très près de la surface dans le réseau de rhizomes et permet d'obtenir tout de même de bons rendements même si les eaux ne s'acheminent pas complètement au travers du sol. Kickuth augmente la capacité hydraulique de l'unité de traitement en augmentant la surface d'entrée des eaux dans le média filtrant.

Cet aménagement consiste à modifier la tranchée d'alimentation en créant un pied de pierre nette avançant sur près du tiers de la largeur de l'unité et sur une profondeur correspondante à moins de la moitié de la profondeur du média filtrant (voir figure 3.2). Les tranchées d'alimentation et de collecte sont habituellement constituées de pierres nettes alors que certaines installations ont des tranchées ouvertes. Malgré leur existence dans certains systèmes européens, les tranchées transversales ouvertes (eau libre) ne sont pas recommandées.

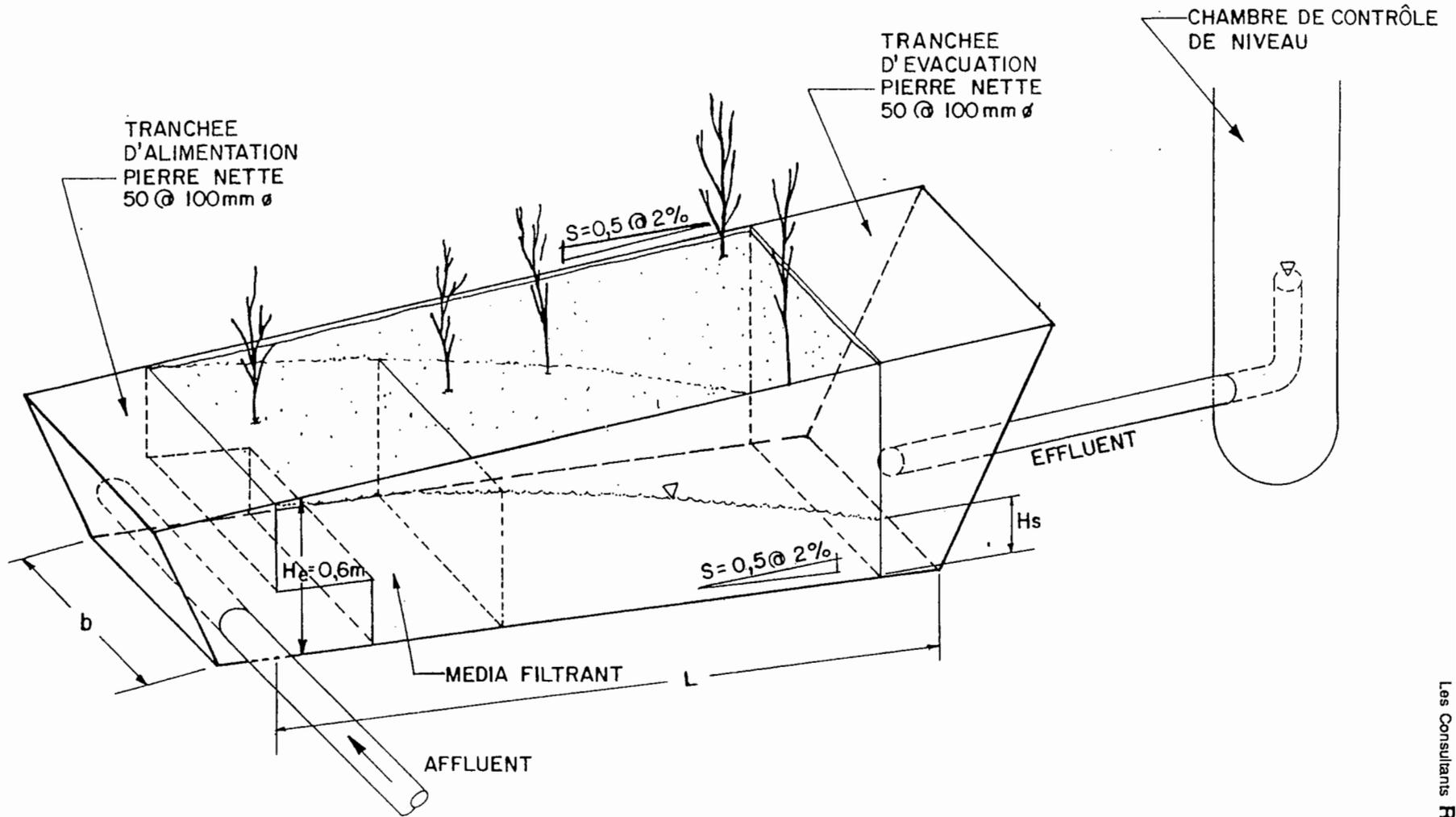
Outre le problème de prolifération des moustiques habituellement rencontré près des plans d'eau libre, ceux-ci sont généralement plus sensibles au gel en période hivernale et peuvent présenter certains problèmes esthétiques.

L'alimentation est normalement continue et seul un dégrillage des eaux usées brutes est nécessaire. Dans la grande majorité des cas, pour les applications municipales, le roseau commun (*Phragmites australis*) est retenu. Pour certaines applications très spécifiques, les joncs (*Juncus sp.*), les scirpes (*Scirpus sp.*), les iris de marais (*Iris pseudacorus*) ou les menthes d'eau (*Mentha aquatica*) peuvent être utilisés. Bien que la majorité de ces installations n'aient pas de système de contrôle de niveau à la sortie, Kickuth recommande, depuis quelques années, que l'on ajoute ce type de contrôle (Kickuth, R. 1989).

Kickuth a développé plusieurs écotypes du roseau commun (*Phragmites australis*) dont la morphologie et les conditions optimales de croissance sont différentes. Il suggère l'usage des plantes de plus grandes dimensions pouvant atteindre de 3 à 3,5 m de

FIGURE 3.2

LIT À ÉCOULEMENT SOUS LA SURFACE  
AVEC PLANTES ÉMERGENTES (HSS)



hauteur, contrairement à la majorité des colonies rencontrées dans les milieux naturels européens et québécois qui atteignent environ 2 m. De plus, il a développé certains écotypes mieux adaptés aux caractéristiques de différentes eaux usées et suggère l'usage de la colonie appropriée à chacune des conditions rencontrées.

Plusieurs de ces types de système ont été implantés en Allemagne depuis 7 ans et plus de 130 au Danemark entre 1984 et 1990 (Brix, H. et al, 1990 a). Dans l'ensemble, les installations danoises ont des problèmes de colmatage et de courts-circuits et l'écoulement se fait principalement en surface. Les résultats d'enlèvement de la DBO et des matières en suspension demeurent acceptables, mais les rendements promis pour l'enlèvement des nutriments ne furent pas atteints et les résultats sont très variables. Certains systèmes construits au Danemark ont étéensemencés avec des plantules provenant de colonies présélectionnées par Kickuth. D'autres systèmes furent plantés à partir de colonie sauvage provenant des environs du site. Brix a observé des différences de hauteur remarquables d'une colonie à l'autre, mais n'a pas pu établir de corrélations entre la morphologie des plantes et le comportement ou le rendement des systèmes. Il en conclut que le choix de l'écotype de roseau commun (*Phragmites australis*) n'est pas déterminant.

Brix, de l'université de Aarhus au Danemark, a réalisé une étude relative à la rigueur scientifique de l'évaluation des performances de la station de Othfresen (Brix, 1987 a). Il en conclut que ces résultats doivent être utilisés avec circonspection avant de généraliser les rendements potentiels d'un tel procédé, compte tenu de son caractère particulier.

Afin de corriger les problèmes rencontrés avec le procédé Kickuth, plusieurs chercheurs ont suggéré des versions légèrement différentes. Geller, ingénieur en Allemagne, a réalisé des expériences sur modèles réduits et à l'échelle nature à Gerneswang près de Munich, de 1985 à 1989. Ses recherches visaient l'élaboration d'un concept permettant d'utiliser la capacité d'adsorption de l'argile tout en évitant les problèmes de colmatage (Geller, G. et al, 1990 a). Geller recommande l'usage du roseau commun (*Phragmites australis*) avec contrôle de niveau à la sortie et sans récolte des plantes, tel que suggéré par Kickuth. Par contre, il recommande d'utiliser un sable avec un maximum de 5 à 10% d'argile afin de profiter d'une meilleure capacité hydraulique du média filtrant contrairement à Kickuth qui maintient une concentration de l'ordre de 40%. Un bassin de sédimentation est suggéré au prétraitement ainsi qu'une alimentation par vagues successives<sup>(1)</sup>. Il recommande de contrôler l'alimentation des unités afin que l'écoulement soit

(1) Périodes séquentielles d'apport d'eaux usées à forts débits durant de courtes périodes et d'arrêt d'alimentation.

toujours légèrement sous la surface du sol. Finalement, il suggère de maintenir une légère pente en surface inverse à la direction de l'écoulement pour éviter les risques de courts-circuits et atténuer les problèmes d'écoulement de surface.

Le "Water Research Center" (WRC), en Angleterre, a entrepris une recherche en 1985 dans le but d'élaborer un manuel de conception pour ce type de procédé (Cooper, P.F., 1990 a). Après avoir visité des installations en Allemagne et rencontré Kickuth, Cooper a réalisé quelques installations selon le procédé Kickuth en Angleterre et suivi les résultats. Il recommande les modifications suivantes au procédé afin d'éviter les problèmes d'écoulement en surface et de colmatage, soit:

- l'usage d'un sol de bonne perméabilité composé de petits graviers non concassés ( $K > 10^{-1}$  cm/s);
- un dégrillage inférieur à 6 mm et une sédimentation en amont des unités à écoulement horizontal;
- le maintien de l'écoulement sous la surface du sol.

Le concept développé en Angleterre permet d'obtenir des rendements intéressants au niveau de l'enlèvement de la DBO et des matières en suspension, mais ce type de système ne permet pas d'enlever le phosphore car le matériau en place ne favorise pas la mise en solution des ions d'aluminium ou ferreux.

La W.P.C.F. aux États-Unis recommande une conception semblable à celle du W.R.C. en Angleterre et précise que ce type de procédé devrait être priorisé en région froide et lorsque les problèmes d'odeur sont importants (W.P.C.F., 1990) plutôt qu'un procédé à écoulement en surface.

La figure 3.2 (page 3-8) montre l'agencement général d'un système à écoulement sous la surface. Les principales composantes consistent en:

- une tranchée d'alimentation normalement composée d'une conduite perforée ensevelie dans une pierre nette grossière;
- un média filtrant planté, dans la majorité des cas, de roseaux communs (*Phragmites australis*);
- une tranchée d'évacuation;
- une chambre de contrôle de niveau.

## B. Systèmes de traitement à écoulement horizontal en surface (HES)

Les systèmes opérant avec des plantes flottantes ont principalement été implantés aux États-Unis et servent surtout au traitement tertiaire (W.P.C.F., 1990). Les plantes utilisées normalement sont la jacinthe d'eau (*Eichornia crassipes*) et le lenticule (*Lemna sp.*). L'usage de la jacinthe d'eau (*Eichornia crassipes*) est limité dans les zones à climat chaud (W.P.C.F., 1990), à moins que le système opère sous serres.

Les lenticules (*Lemna sp.*) peuvent croître à des températures plus froides jusqu'à une limite inférieure d'environ 5° C. Tel que montré à la figure 3.3, les systèmes avec lenticules (*Lemna sp.*) doivent comprendre une série de barrières flottantes afin d'éviter le déplacement de ces dernières par le vent. La compagnie "Lemna Corporation" a d'ailleurs développé et breveté ces types d'installation. Cette compagnie utilise ce procédé principalement pour améliorer les performances des systèmes de lagunage existants et empêcher la prolifération des algues en fin de procédé. Lorsqu'une récolte intensive des lenticules (*Lemna sp.*) est effectuée, il est possible d'assurer un bon enlèvement de phosphore et d'azote (Lemna Corporation, 1991). On prévoit normalement une section de lagunage en prétraitement de ces procédés.

Certains marais naturels aux États-Unis ont été utilisés pour le traitement des eaux usées. Le type de plante, l'épaisseur d'eau et les superficies unitaires sélectionnées sont très variables et spécifiques à chacun des sites. Dans la majorité des cas, compte tenu des règlements en vigueur, un traitement secondaire doit précéder l'usage du marais naturel. Cette approche est limitée à des zones comme le SUD-EST américain qui compte de grandes superficies marécageuses (W.P.C.F., 1990).

Finalement, on retrouve, principalement aux États-Unis et aussi à la station expérimentale de Viville à Arlon, Belgique, des marais à écoulement en surface avec plantes émergentes. La quenouille (*Typha sp.*) est considérée, par Radoux, la plus performante dans ce contexte (Radoux, M., 1991 b). Le jonc (*Juncus sp.*) et le roseau commun (*Phragmites australis*) sont rencontrés à certains endroits. L'épaisseur d'eau peut normalement varier de 0,2 à 0,4 m. On recommande un dégrillage et une décantation à l'entrée. Ces types de procédé créent, de temps à autre, des problèmes d'odeur et de prolifération de moustiques (W.P.C.F., 1990). Bien que les systèmes étroits et longs semblent plus performants, la W.P.C.F. (W.P.C.F., 1990) recommande des ratios longueur/largeur variant de 1/1 à 4/1 pour avoir un bon équilibre entre les coûts des travaux et les rendements escomptés. En effet, pour une même superficie, un système étroit nécessite une plus grande quantité de digues et des frais de remblai et déblai plus importants.

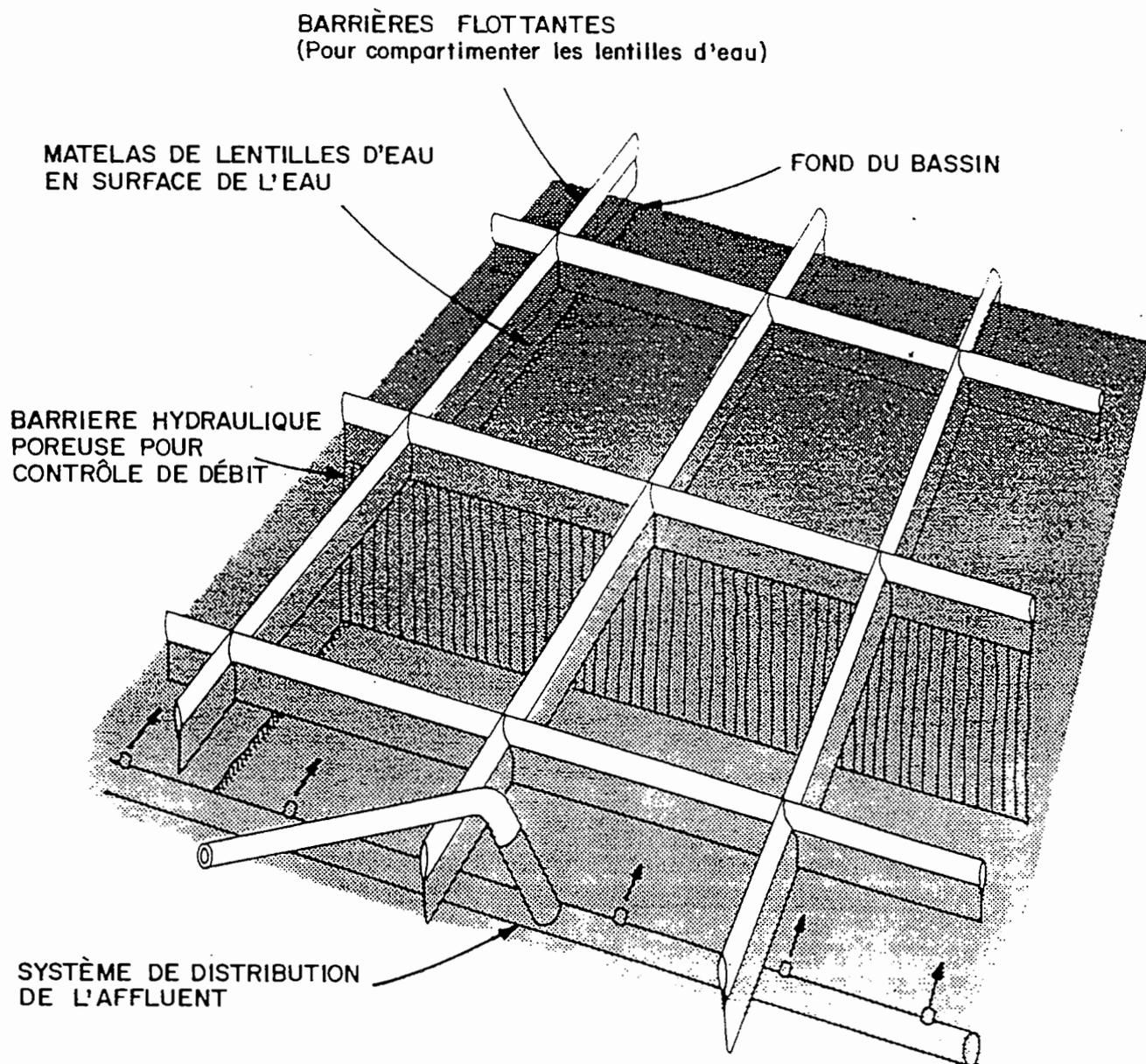
FIGURE 3.3

**SYSTÈME DE TRAITEMENT À PARTIR DE LENTICULES**

SECTION TYPE DES INSTALLATION DE LEMNA CORPORATION\*

(Unité type HESF)

Source : TCHOBANOGLOUS, GEORGE, 1991



\* BREVET US. POUR TRAITEMENT DES EAUX USÉES

### C. Systèmes hybrides

Le dernier groupe présenté à la partie C du tableau 3.1 (pages 3-4 à 3-6) regroupe les systèmes composés de plusieurs unités différentes sur plusieurs étages. La première version de ce type de procédé a été développée en 1946 par Seidel en Allemagne. Ce procédé, appelé "Max Planck Institute Process" ou procédé "Krefeld", comprend normalement de 4 à 5 étages. Le prétraitement dans certains cas est seulement un dégrillage ou quelquefois des fosses septiques. L'alimentation du premier étage de traitement est intermittente sur des périodes d'alimentation d'environ 2 jours et de repos d'environ 7 jours. Ce procédé a été breveté par Seidel en 1972 (Seidel, 1973). Les premiers étages sont normalement plantés de roseaux communs (*Phragmites australis*) ou de glycéries (*Glyceria aquatica*) et opèrent à écoulement vertical. Ceux-ci sont suivis de un à deux étages à écoulement horizontal sous la surface dans un média sableux. On peut y retrouver des scirpes (*Scirpus sp.*), iris (*Iris sp.*), joncs des chaisiers (*Scirpus lacustris*), rubaniers (*Sparganium sp.*), carex (*Carex sp.*), quenouilles (*Typha sp.*) et acorus roseau (*Acorus calamus*). Le dernier étage est à écoulement horizontal en surface. Ce procédé existe sous plusieurs versions légèrement différentes mais le concept général demeure le même. Il fut implanté jusqu'à maintenant pour de petites installations allant jusqu'à 100 personnes équivalent.

Le procédé Lelystad fut développé en Hollande. Il est composé de canaux longs et étroits (plusieurs centaines de mètres de longueur, moins de 5 m de largeur) plantés de joncs des chaisiers (*Scirpus lacustris*) ou de roseaux communs (*Phragmites australis*). L'eau usée y circule, soit en translation au-dessus du sol, soit en percolation verticale au travers du sol, soit encore un mélange de ces deux types de circulation (Radoux, M., 1989).

Un procédé de type "Seidel" fut implanté à Camphill Village en Angleterre et la figure 3.4 montre un croquis des installations composées d'une fosse septique, de deux étages verticaux, d'une fosse de décantation, d'un système d'aération naturelle, de deux étages à écoulement horizontal sous la surface et, finalement, d'un système à écoulement horizontal en surface (Burka, U. et al, 1990). Une autre version, légèrement différente de ce type de procédé, fut implantée à Pannessières en France (Mettetal, J. P. et al, 1990) et comporte deux unités verticales, une unité horizontale sous la surface et une dernière unité horizontale en surface. Les plantes utilisées sont des roseaux communs (*Phragmites australis*), à l'exception du dernier étage où on retrouve des iris (*Iris sp.*).

Le CEMAGREF (Centre National du Machinisme Agricole du Génie Rural des Eaux et des Forêts) en France a construit quelques variantes de ce procédé, entre autres à Saint-Bohaire (Boutin, C., 1987, Liénard et al, 1990 a). La figure 3.5 montre une

FIGURE 3.4

SYSTÈME HYBRIDE

DE TYPE "MAX PLANCK INSTITUTE PROCESS"

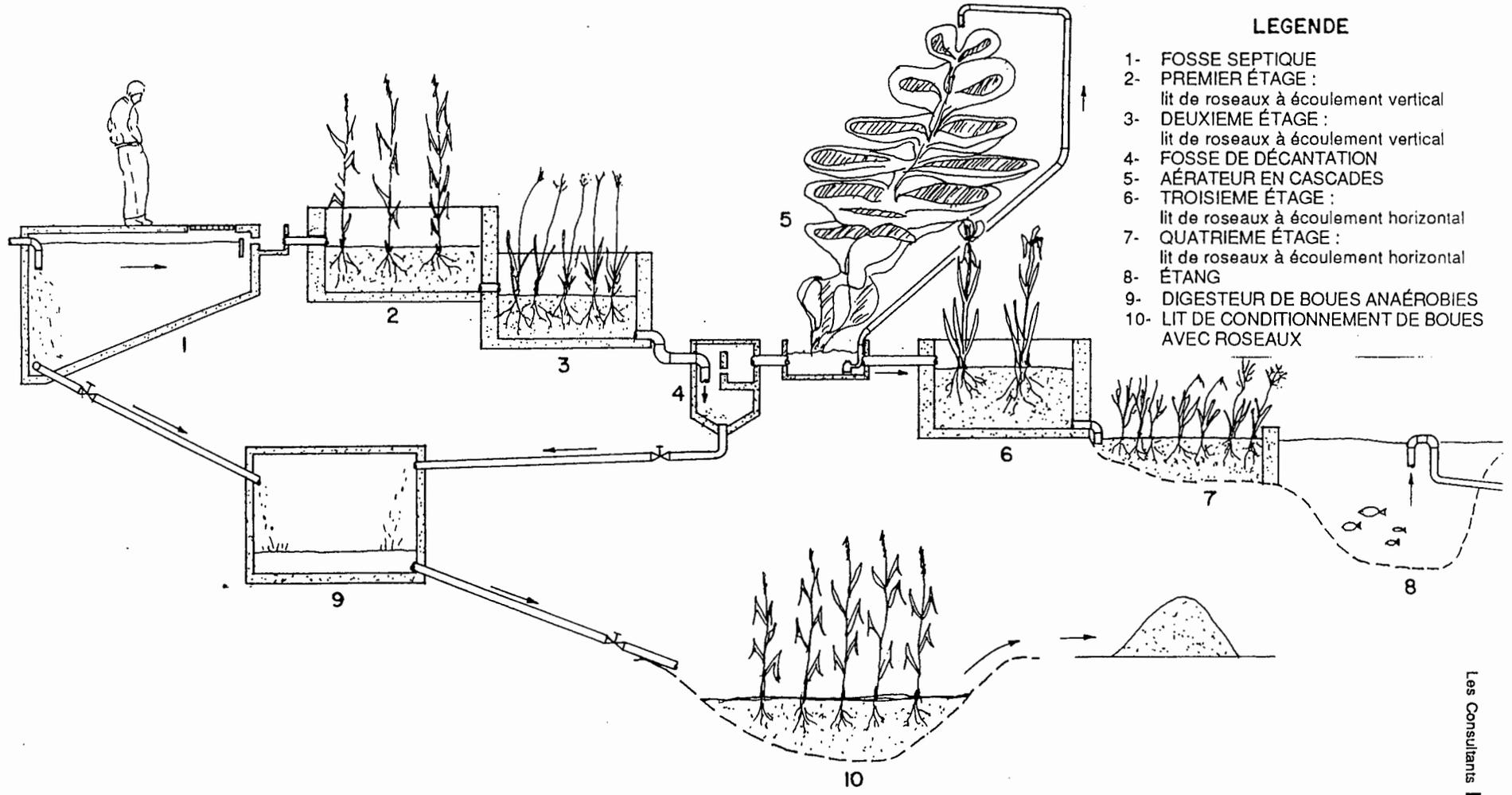


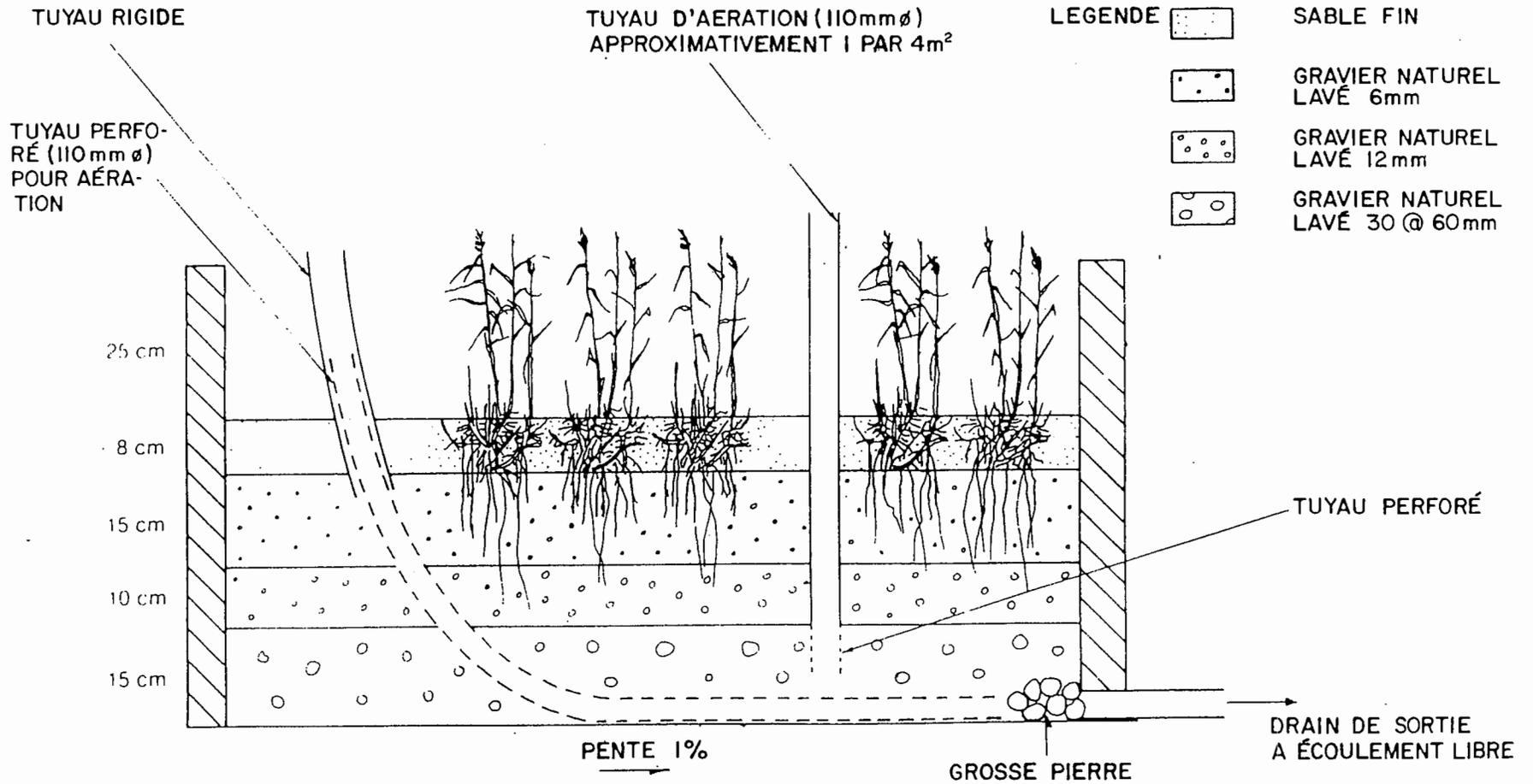
FIGURE 3.5

1<sup>er</sup> ET 2<sup>e</sup> ÉTAGES D'UN SYSTEME DU "MAX PLANCK INSTITUTE"  
(Seidel)

LITS DE ROSEAUX À ÉCOULEMENT VERTICAL

(UNITÉ TYPE V)

SOURCE: COOPER, 1990 2



coupe type d'une unité verticale. Elle comporte une couche de sable en surface et des matériaux plus grossiers en profondeur. Des conduits d'aération installés environ aux 4 m<sup>2</sup> facilitent le maintien des conditions aérobies dans l'élément épurateur.

Le CEMAGREF recommande de laisser tomber les unités à écoulement horizontal en surface en fin de traitement, car elles occasionnent une remise en solution de certains nutriments et favorisent souvent une augmentation de l'activité bactériologique. De plus, il suggère de prévoir, au niveau du prétraitement, un dégrillage ou une décantation rapide afin d'éviter d'obtenir des conditions anoxiques qui peuvent créer des problèmes d'odeur à l'entrée des champs de roseaux communs (*Phragmites australis*).

Radoux, de la fondation universitaire Luxembourgeoise en Belgique, a élaboré un système qu'il appelle "Hiérarchisation d'écosystèmes artificiels" (Fondation Universitaire Luxembourgeoise, 1991) qui consiste en une reconstitution globale d'un marais naturel à partir du centre vers la rive. La figure 3.6 montre un exemple de la séquence des unités, soit un premier traitement à l'aide d'un bassin de sédimentation ou d'un lagunage non aéré, un second composé d'un système à écoulement en surface planté de quenouilles (*Typha sp.*), un troisième système à écoulement vertical dans le sol composé de différents arbustes et un dernier système à écoulement en surface composé de quenouilles (*Typha sp.*) et d'autres plantes de marais. Une installation de ce type a été construite à Lallaing en France et sera mise en exploitation en 1992 (Radoux, M. et al, 1991 c).

### **3.3 Dimensionnement et performances de certains systèmes existants**

#### **3.3.1 Généralités**

Les tableaux 3.2 à 3.8 présentent brièvement les dimensions et les rendements des trois principaux types de système de traitement avec plantes aquatiques installés dans le monde, soit:

- des systèmes à écoulement horizontal sous la surface (HSS) au tableau 3.2;
- des systèmes à écoulement horizontal en surface avec plantes flottantes ou immergées (HESF) au tableau 3.3 et avec plantes émergentes (HESE) au tableau 3.4;
- des systèmes hybrides aux tableaux 3.5 à 3.8. Les éléments suivants sont énumérés dans chacun de ces tableaux:
  - les dimensions générales des systèmes incluant la longueur, la largeur, la profondeur ainsi que la superficie de traitement;

FIGURE 3.6

**EXEMPLE D'UNE HIÉRARCHISATION  
D'ÉCOSYSTEMES ARTIFICIELS (TYPE RADOUX)**  
(unité type HESE; V; HESE)  
Source : FONDATION UNIVERSITAIRE  
(LUXEMBOURGEOISE, 1991)

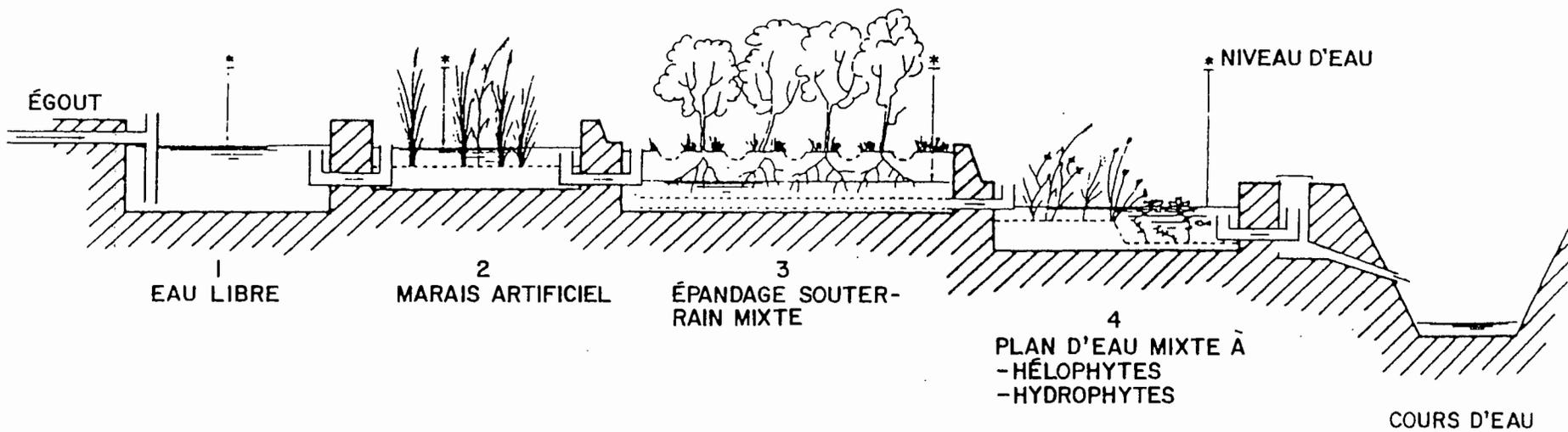


TABLEAU 3.2

**DIMENSIONNEMENT ET PERFORMANCES DE SYSTÈMES HSS EXISTANTS**

LOCALISATION	RÉFÉRENCES	SURFACE (m <sup>2</sup> )	LONGUEUR (m)	LARGEUR (m)	DÉBIT D'ENTRÉE (m <sup>3</sup> /d)	PÉRIODE DE DONNÉES (jour)	TAUX D'APPLICATION HYDRAULIQUE (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·d)	PROFONDEUR MOYENNE (cm)	RATIO LONGUEUR/LARGEUR
Benton	Watson et al. 1989					90	0,0653		
Bluther 1	Cooper et al. 1987	40	4,24	9,43	4,25		0,1063		0,45
Bluther 2	Cooper et al. 1987	40	4,24	9,43	4,25		0,1063		0,45
Bluther 3	Cooper et al. 1987	40	4,24	9,43	4,25		0,1063		0,45
Bluther 4	Cooper et al. 1987	40	4,24	9,43	4,25		0,1063		0,45
Borup	Brix 1987	1 440	48,00	30,00	76,00		0,0530		1,60
Castleroe	Cooper et al. 1987	30	8,12	3,69	5,00		0,1667		2,20
Emmitsburg 84-86	Theisen 1987	690	76,00	9,08	110,00	557	0,1594	46	8,37
Gerneswang	Geller	500							
Gravesend 1	Cooper et al. 1987	1 200	34,64	34,64	33,00		0,0275		1,00
Gravesend 2	Cooper et al. 1987	1 200	34,64	34,64	33,00		0,0275		1,00
Gravesend 3	Cooper et al. 1987	1 200	34,64	34,64	33,00		0,0275		1,00
Hawkesbury	Bavor et al. 1987	400	100,00	4,00	10,56	365	0,0264	50	25,00
Hjordkaer	Brix 1987	1 130	13,02	86,79	227,00		0,2010		0,15
Holtby	Cooper et al. 1987	610	17,98	33,93	30,00		0,0492		0,53
Ingstrup	Brix 1987	110	13,22	8,32	1,90		0,017		1,59
Kalo	Brix 1987	760	20,07	37,87	114,00		0,1500	100	0,53
Knudby	Brix 1987	360	18,97	18,97	25,00		0,0690		1,00
Lunderskov	Brix 1987	1 500	25,10	59,76	76,00		0,0510		0,42
Marmhull 1	Cooper 1988					300	0,0446		
Marmhull 2	Cooper 1988					300	0,0690		
Middleton	Cooper 1988					240	0,0889		
Moesgard	Brix 1987	500	20,00	25,00	68,00		0,1360		0,80
Othfresen	Kickuth	225 000							
Rugballegard	Brix 1987	100	12,25	8,16	7,60		0,0760		1,50
Santee 1	Gersberg 1986	65	18,56	3,50	3,04	518	0,0468	76	5,30
Santee 2	Gersberg 1986	65	18,56	3,50	3,04	518	0,0458	76	5,30
Santee 3	Gersberg 1986	65	18,56	3,50	3,04	518	0,0468	76	5,30
Strelton	Cooper et al. 1987	20	10,00	2,00	10,00		0,5000*		5,00
Valleyfield	Kickuth	45							
Witzenhausen	Pauly	70						60	
<b>MOYENNE</b>							0,08		
<b>ÉCART-TYPE</b>							0,05		

\* Ce nombre n'est pas retenu dans le calcul de la moyenne.

TABLEAU 3.2

**DIMENSIONNEMENT ET PERFORMANCES DE SYSTÈMES HSS EXISTANTS (suite)**

LOCALISATION	DEMANDE BIOCHIMIQUE EN OXYGÈNE (5 jours)					MATIÈRES EN SUSPENSION TOTALES				
	Concentration		Masse		Rendements	Concentration		Masse		Rendements
	Affluent (mg/l)	Effluent (mg/l)	Taux d'application (g/m <sup>2</sup> .d)	Taux d'enlèvement (g/m <sup>2</sup> .d)		Affluent (mg/l)	Effluent (mg/l)	Taux d'application (g/m <sup>2</sup> .d)	Taux d'enlèvement (g/m <sup>2</sup> .d)	
Benton	28	14			50	56	12			79
Bluther 1	221	47	23,10	18,20	79	154	25	16,10	13,50	84
Bluther 2	221	59	14,20	10,40	73	154	25	9,90	8,30	84
Bluther 3	221	30	22,10	19,10	86	154	20	15,40	13,40	87
Bluther 4	221	56	18,70	13,90	74	154	21	13,00	11,20	86
Borup	98	39	5,20	3,10	60					
Castleroe	80	73	6,90	0,60	9	53	19	4,60	3,00	65
Emittsburg 84-86	61,5	18	9,00	6,93	71	30,2	8,3	4,82	3,49	73
Gerneswang					98					
Gravesend 1	235	110	6,40	3,40	53	151	75	4,10	2,10	51
Gravesend 2	235	116	6,40	3,20	50	151	78	4,10	2,00	49
Gravesend 3	235	92	6,40	3,90	61	151	46	4,10	2,80	68
Hawkesbury	33	4,6	0,87	0,75	86	57	4,5	1,51	1,39	92
Hjordkaer	149	54	21,90	19,10	87					
Holtby	238	49	11,70	9,30	79	205	24	10,00	8,90	89
Ingstrup	368	18	6,40	6,10	95					
Kalo	75	36	11,20	5,80	52					
Knudby	142	29	9,90	7,90	80					
Lunderskov	52	23	2,60	1,45	56					
Marmhull 1	87	13			85	74	23			69
Marmhull 2	87	17			80	74	20			73
Middleton	11	3			73	30	8			73
Moesgard	106	22	14,40	11,40	79					
Othfresen		7 @ 17			98					
Rugballegard	470	39	35,70	32,70	92					
Santee 1	118,3	5,3	5,53	5,45	99	57,3	1,5	2,68	2,62	98
Santee 2	118,3	30,4	5,53	4,11	74	57,3	17,7	2,68	2,42	90
Santee 3	118,3	22,3	5,53	4,49	81	57,3	5,4	2,68	2,31	86
Stretton	160	18	10,00	8,90	89	184	22	11,50	10,10	88
Valleyfield					77					
Witzenhausen					88					
<b>MOYENNE</b>			<b>11,30</b>	<b>8,70</b>	<b>75</b>			<b>7,14</b>	<b>5,83</b>	<b>78,1</b>
<b>ÉCART-TYPE</b>			<b>8,20</b>	<b>7,63</b>	<b>19</b>			<b>5,00</b>	<b>4,50</b>	<b>13,4</b>

TABLEAU 3.2

**DIMENSIONNEMENT ET PERFORMANCES DE SYSTÈMES HSS EXISTANTS (suite)**

LOCALISATION	AZOTE AMMONIACAL (NH3-N)					AZOTE TOTAL				
	Concentration		Masse			Concentration		Masse		
	Affluent (mg/l)	Effluent (mg/l)	Taux d'application (g/m2.d)	Taux d'enlèvement (g/m2.d)	Rendements (%)	Affluent (mg/l)	Effluent (mg/l)	Taux d'application (g/m2.d)	Taux d'enlèvement (g/m2.d)	Rendements (%)
Benton	8,7	12,1			-39	17,1	13,7			20
Bluther 1										
Bluther 2										
Bluther 3										
Bluther 4										
Borup						30	23	1,58	0,37	25
Castleroe										
Ermittsburg 84-86										
Gerneswang										30
Gravesend 1										
Gravesend 2										
Gravesend 3										
Hawkesbury	35	10,6	0,92	0,64	70					
Hjordkaer						41	29	8,20	2,40	29
Holby										
Ingstrup						112	12	1,90	1,70	88
Kalo						45	40	6,75	0,75	10
Knudby						38	27	2,60	0,75	23
Lunderskov						14	6	0,71	0,41	53
Marmhull 1	28,9	26,4			9					
Marmhull 2	28,9	28,2			2					
Middleton	2,8	1,5			46					
Moesgard						45	30	6,10	2,00	30
Othfresen							3 @ 14			81
Rugballegard						89	33	6,80	4,30	62
Santee 1	24,7	1,5	1,16	1,09	94	27,8	2	1,30	1,21	93
Santee 2	24,7	17,7	1,16	0,33	28					
Santee 3	24,7	5,4	1,16	0,90	78					
Stretton										
Valleyfield										
Witzenhausen										40
<b>MOYENNE</b>			1,10	0,74	36,0			4,00	1,54	44,9
<b>ÉCART-TYPE</b>			0,12	0,33	44,7			2,91	1,26	27,8

TABLEAU 3.2

**DIMENSIONNEMENT ET PERFORMANCES DE SYSTÈMES HSS EXISTANTS (suite)**

LOCALISATION	PHOSPHORE TOTAL				
	Concentration		Masse		Rendements (%)
	Affluent (mg/l)	Effluent (mg/l)	Taux d'application (g/m <sup>2</sup> .d)	Taux d'enlèvement (g/m <sup>2</sup> .d)	
Benton	5,7	4,9			14
Bluther 1	16,6	5,8	1,73	1,13	
Bluther 2	16,6	4,1	1,07	0,81	
Bluther 3	16,6	1,8	1,66	1,48	
Bluther 4	16,6	2,8	1,40	1,16	
Borup	11,7	10,4	0,62	0,07	18
Castleroe	6	4,4	0,52	0,14	
Emittsburg 84-86					
Gerneswang					36
Gravesend 1	13,9	7,5	0,38	0,17	
Gravesend 2	13,9	7,2	0,38	0,18	
Gravesend 3	13,9	4,2	0,38	0,26	
Hawkesbury	10	6,8	0,26	0,08	32
Hjordkaer	14,1	11,7	2,80	0,48	17
Holtby	7,4	6,8	0,36	0,03	
Ingstrup	51	3,2	0,09	0,08	94
Kalo	9,3	8,8	1,40	0,08	11
Knudby	12,9	7,8	0,90	0,36	31
Lunderskov	4,2	2,4	0,21	0,09	45
Marmhull 1					
Marmhull 2					
Middleton	10,8	7,6			30
Moesgard	6,6	3,8	0,90	0,38	38
Othfresen		0,08 @ 1,1			42
Rugballegard	17,8	3	1,35	1,12	83
Santee 1					
Santee 2					
Santee 3					
Stretton					
Valleyfield					61
Witzenhausen					40
<b>MOYENNE</b>			<b>0,91</b>	<b>0,45</b>	<b>39</b>
<b>ÉCART-TYPE</b>			<b>0,71</b>	<b>0,47</b>	<b>24</b>

**TABLEAU 3.3**

**DIMENSIONNEMENT ET PERFORMANCES DE SYSTÈMES HESF EXISTANTS**

LOCALISATION	RÉFÉRENCE	SURFACE (m <sup>2</sup> )	DÉBIT MOYEN DE CONCEPTION (m <sup>3</sup> /d)	Q/S	TEMPS DE RÉTENTION HYDRAULIQUE (d)	TAUX D'APPLICATION HYDRAULIQUE (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·d)	VOLUME ACTIF (m <sup>3</sup> )	PROFONDEUR MOYENNE (cm) 120-360
De Ridder (Louisiane)	Lemna Corporation	334	13,25	0,04	26	0,0397	5 700	152
Devil's Lake (Dakota du Nord)	Lemna Corporation	202 000	17 000	0,08	22	0,0841	290 000	120
Ellaville (Georgie)	Lemna Corporation	10 100	760	0,08	20	0,0752	15 100	152
Ogema (Wisconsin)	Lemna Corporation	4 050	284	0,07	38	0,0701	5 030	
Pontotoc (Mississippi)	Lemna Corporation							
Saint Tammany Parish (Louisiane)	Lemna Corporation	1 800	950	0,53	15	0,5277*		305
Sleepy Eye (Minnesota)	Lemna Corporation							
<b>MOYENNE</b>				0,067	24,2	0,0670		
<b>ÉCART-TYPE</b>				0,019	8,7	0,0190		

\* Ce nombre n'est pas retenu dans le calcul de la moyenne.

TABLEAU 3.3

**DIMENSIONNEMENT ET PERFORMANCES DE SYSTÈMES HESF EXISTANTS (suite)**

LOCALISATION	DEMANDE BIOCHIMIQUE EN OXYGÈNE (5 jours)					MATIÈRES EN SUSPENSION TOTALES				
	Concentration		Masse			Concentration		Masse		
	Affluent (mg/l)	Effluent (mg/l)	Taux d'application (g/m <sup>2</sup> -d)	Taux d'enlèvement (g/m <sup>2</sup> -d)	Rendements (%)	Affluent (mg/l)	Effluent (mg/l)	Taux d'application (g/m <sup>2</sup> -d)	Taux d'enlèvement (g/m <sup>2</sup> -d)	Rendements (%)
De Ridder (Louisiane)	28 (13-60)	5 (2-12)	1,11	0,91	82	55 (15-120)	7 (1-23)	2,18	1,90	87
Devil's Lake (Dakota du Nord)	28 (15-40)	<10	2,36	1,51	64	46	1	3,87	3,79	98
Ellaville (Georgie)		13 (5-23)					12 (2-31)			
Ogema (Wisconsin)		11 (5-22)					13 (5-26)			
Pontotoc (Mississippi)	74,9	7,4			90	83	15,5			81
Saint Tammany Parish (Louisiane)		8 (3-17)					8 (4-12)			
Sleepy Eye (Minnesota)	240	18			92,5	364	34			90,6
<b>MOYENNE</b>			1,735	1,21	82,1			3,03	2,85	89,2
<b>ÉCART-TYPE</b>			0,884	0,424	12,9			1,20	1,30	7,1

TABLEAU 3.3

**DIMENSIONNEMENT ET PERFORMANCES DE SYSTÈMES HESF EXISTANTS (suite)**

LOCALISATION	PHOSPHORE TOTAL				
	Concentration		Masse		
	Affluent (mg/l)	Effluent (mg/l)	Taux d'application (g/m <sup>2</sup> ·d)	Taux d'enlèvement (g/m <sup>2</sup> ·d)	Rendements (%)
De Ridder (Louisiane)					
Devil's Lake (Dakota du Nord)	2,5	0,1	0,21	0,2	96
Ellaville (Georgie)					
Ogema (Wisconsin)					
Pontotoc (Mississippi)					
Saint Tammany Parish (Louisiane)					
Sleepy Eye (Minnesota)	28	6			78,8
<b>MOYENNE</b>					<b>67,40</b>
<b>ÉCART-TYPE</b>					<b>12,16</b>

TABLEAU 3.4

**DIMENSIONNEMENT ET PERFORMANCES DE SYSTÈMES HESE EXISTANTS**

LOCALISATION	RÉFÉRENCES	SURFACE (m <sup>2</sup> )	LONGUEUR (m)	LARGEUR (m)	DÉBIT D'ENTRÉE (m <sup>3</sup> /d)	PÉRIODE DE DONNÉES (d)	TAUX D'APPLICATION HYDRAULIQUE (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> -d)	PROFONDEUR MOYENNE (cm)	TEMPS DE RÉTENTION HYDRAULIQUE (d)	RATIO LONGUEUR/ LARGEUR
Arcata High	Gearheart 1985	361	60,08	6,01	87,2	365	0,2416	47	1,9	10
Arcata Low	Gearheart 1985	361	60,08	6,01	21,8	365	0,0604	47	7,8	10
Arcata Med	Gearheart 1985	361	60,08	6,01	43,6	365	0,1208	47	3,9	10
Benton	Watson et al. 1989	361								
Brookhaven	Small 1978									
Lk Coral 83-84	Knight et al. 1985	210 000			1477	365	0,0070	108	153,6*	
Iselin 83-85	Watson et al. 1987	2 200			26	943	0,0118			
Listowel 3	Herskowitz 1987	1 320	331,99	3,98	17	1460	0,0129	30	23,3	83,5
Listowel 4	Herskowitz 1987	1 320	331,99	3,98	17	1460	0,0129	30	23,3	83,5
<b>MOYENNE</b>							<b>0,0670</b>		<b>12,04</b>	
<b>ÉCART-TYPE</b>							<b>0,0870</b>		<b>10,5</b>	

\* Ce nombre n'est pas retenu dans le calcul de la moyenne.

TABLEAU 3.4

**DIMENSIONNEMENT ET PERFORMANCES DE SYSTÈMES HESE EXISTANTS (suite)**

LOCALISATION	DEMANDE BIOCHIMIQUE EN OXYGÈNE (5 jours)					MATIÈRES EN SUSPENSION TOTALES				
	Concentration		Masse			Concentration		Masse		
	Affluent (mg/l)	Effluent (mg/l)	Taux d'application (g/m <sup>2</sup> -d)	Taux d'enlèvement (g/m <sup>2</sup> -d)	Rendements (%)	Affluent (mg/l)	Effluent (mg/l)	Taux d'application (g/m <sup>2</sup> -d)	Taux d'enlèvement (g/m <sup>2</sup> -d)	Rendements (%)
Arcata High	26	12,8	12,560	6,375	51	37	5,4	17,872	15,262	85
Arcata Low	26	10,72	3,142	1,844	59	37	6,08	4,470	3,733	84
Arcata Med	26	13,32	6,283	3,066	49	37	5,7	8,940	7,566	85
Benton										
Brookhaven										
Lk Coral 83-84	11,6	2,6	0,083	0,067	81	6	1,5	0,048	0,038	80
Iselln 83-85	140	7,4	1,658	1,570	95	380	19	4,499	4,274	95
Listowel 3	19,6	7,6	0,252	0,149	59	22,8	9,2	0,293	0,179	61
Listowel 4	56,3	9,6	0,723	0,593	82	111,1	8	1,427	1,327	93
<b>MOYENNE</b>			<b>3,529</b>	<b>2,000</b>	<b>68,0</b>			<b>5,364</b>	<b>4,626</b>	<b>83,3</b>
<b>ÉCART-TYPE</b>			<b>4,533</b>	<b>2,200</b>	<b>17,8</b>			<b>6,328</b>	<b>5,391</b>	<b>11,1</b>

TABLEAU 3.4

**DIMENSIONNEMENT ET PERFORMANCES DE SYSTÈMES HESE EXISTANTS (suite)**

LOCALISATION	AZOTE AMMONIACAL (NH <sub>3</sub> -N)					AZOTE TOTAL				
	Concentration		Masse			Concentration		Masse		
	Affluent (mg/l)	Effluent (mg/l)	Taux d'application (g/m <sup>2</sup> -d)	Taux d'enlèvement (g/m <sup>2</sup> -d)	Rendements (%)	Affluent (mg/l)	Effluent (mg/l)	Taux d'application (g/m <sup>2</sup> -d)	Taux d'enlèvement (g/m <sup>2</sup> -d)	Rendements (%)
Arcata High	12,8	9,8	6,185	1,449	23					
Arcata Low	12,8	9,6	1,548	0,394	25					
Arcata Med	12,8	11,6	3,088	0,288	9					
Benton										
Brookhaven										
Lk Coral 83-84						20	1,6	0,142	0,132	93
Iselin 83-85	30	3,3	0,355	0,316	89					
Listowel 3	7,2	3,8	0,092	0,036	39	12,2	6,3	0,154	0,066	43
Listowel 4	8,6	6,1	0,110	0,025	23	19,1	8,9	0,240	0,115	48
<b>MOYENNE</b>			1,896	0,418	35			0,179	0,104	61,3
<b>ÉCART-TYPE</b>			2,398	0,527	28			0,053	0,034	27,5

TABLEAU 3.4

**DIMENSIONNEMENT ET PERFORMANCES DE SYSTÈMES HESE EXISTANTS (suite)**

LOCALISATION	PHOSPHORE TOTAL				
	Concentration		Masse		
	Affluent (mg/l)	Effluent (mg/l)	Taux d'application (g/m <sup>2</sup> ·d)	Taux d'enlèvement (g/m <sup>2</sup> ·d)	Rendements (%)
Arcata High					
Arcata Low					
Arcata Med					
Benton					
Brookhaven					
Lk Coral 83-84	6,2	5,2	0,046	0,014	31
Iselin 83-85	13	2,6	0,154	0,123	80
Listowel 3	1	0,5	0,013	0,006	46
Listowel 4	3,2	0,6	0,041	0,032	79
<b>MOYENNE</b>			<b>0,063</b>	<b>0,044</b>	<b>59,00</b>
<b>ÉCART-TYPE</b>			<b>0,062</b>	<b>0,054</b>	<b>24,45</b>

TABLEAU 3.5

**PERFORMANCES DES SYSTÈMES HYBRIDES  
À OAKLANDS PARK, ANGLETERRE**

PARAMÈTRES	AFFLUENT	EFFLUENT					RENDEMENT GLOBAL * (%)
		ÉTAGE 1	ÉTAGE 2	ÉTAGE 3	ÉTAGE 4	ÉTAGE 5	
<b>DBO5</b> — Concentration (mg/l) (% Enlèvement)	246	46 (81)	15 (67)	6 (60)	2,5 (58)	13,8* (-450)	99
<b>MES</b> — Concentration (mg/l) (% Enlèvement)	213	38,5 (82)	17,7 (54)	9,2 (48)	4 (57)	27,4* (-585)	98
<b>NH3-N</b> — Concentration (mg/l) (% Enlèvement)	58,2	32,9 (43)	16,2 (51)	16,1 (6)	14,2 (12)	4,7* (67)	76
<b>PO4-P</b> — Concentration (mg/l) (% Enlèvement)	8,04	5,5 (32)	5,2 (5)	4,1 (21)	3,9 (5)	2,7* (31)	52
<b>BACTÉRIES</b> — Coliformes totaux (n/100 ml) (% Enlèvement)	2,31 X 10E6	—	2,4 X 10E5 (90)	—	—	680 (99,7)	99,97
— E. coli (n/100 ml) (% Enlèvement)	5 X 10E5	—	NIL (100)	—	—	NIL (0)	100
— Streptocoques fécaux (n/100 ml) (% Enlèvement)	2,2 X 10E4	—	3 X 10E3 (86)	—	—	25 (99,2)	99,9

\*: Le 5e étage (HES) n'est pas retenu dans le calcul du rendement global.

TABLEAU 3.6

**PERFORMANCES DES SYSTÈMES HYBRIDES  
À SAINT-BOHAIRE**  
(entre décembre 1983 et mars 1988)

PARAMÈTRES	AFLUENT	EFFLUENT					RENDEMENT GLOBAL %
		ÉTAGE 1	ÉTAGE 2	ÉTAGE 3	ÉTAGE 4	ÉTAGE 5	
		n = 10	n = 9	n = 9	n = 8	n = 8	
DCO mg/l (% Enlèvement)	748	350 (53)	231 (34)	179 (23)	143 (20)	112 (22)	85
DBO5 mg/l (% Enlèvement)	287	145 (50)	87 (40)	53 (39)	38 (28)	28 (26)	90
MES mg/l (% Enlèvement)	272	47 (83)	41 (13)	31 (24)	28,7 (7,4)	21 (27)	92
NTK mg/l (% Enlèvement)	64	50,5 (21)	42 (17)	40 (5)	35,7 (11)	31,1 (13)	51
NH4-N mg/l (% Enlèvement)	43,6	39,5 (9)	35 (11)	34 (9)	31,8 (7)	27,6 (13)	36,7
NO3-N mg/l	0,11	0,20	0,20	0,11	0,15	0,17	
NO2-N mg/l	0	0,1	0,3	22,2	0,17	0,1	
Total P mg/l	16,1	20,6	22,5	18,1	21,9	19,7	
PO4-P mg/l	7,9	16,4	18,2		18,0	16,4	

\* Nombre d'échantillons

(Cooper, P. F., 1990 a)

TABLEAU 3.7

**DIMENSIONNEMENT DES SYSTÈMES HYBRIDES  
À OAKLANDS PARK, ANGLETERRE**

PARAMÈTRES	ÉTAGE 1	ÉTAGE 2	ÉTAGE 3	ÉTAGE 4	ÉTAGE 5	TOTAL
1 Débit (m3/d)	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	
Type d'unité (horizontale ou verticale)	V	V	V ou HSS	HSS	Surface (HES)	
2 Charge massique (kg DBO5/d)	2,400	0,450	0,147	0,060	0,024	
3 Nombre d'unités/étage	6	3	1	1	1	
4 Longueur d'une unité (m)	—	—	—	—	—	
5 Largeur d'une unité (m)	—	—	—	—	—	
6 Profondeur d'une unité (cm)	—	—	—	—	—	
7 Superficie d'une unité (m2)	8	5	8	20	90	
8 Superficie totale de l'étage (m2)	48	15	8	20	90*	91
Taux d'application hydraulique (m3/m2-d)						
9 — Par unité (1)/(7) **	1,225	1,96	1,225	0,49	—	
10 — Pour l'étage (1)/(8)	0,2	0,653	1,225	0,49	—	0,11
Taux d'application massique (g DBO5/m2-d)						
11 — Par unité (2)/(7)/10 <sup>3</sup> **	300	90	18,4	3	0,27*	
12 — Pour l'étage (2)/(8)/10 <sup>3</sup>	50	30	18,4	3	0,27*	26,5
13 Taux d'enlèvement de la DBO5 (%)	81	67	60	58	- 450*	99



ou



\* : N'est pas retenu dans le calcul du rendement global.

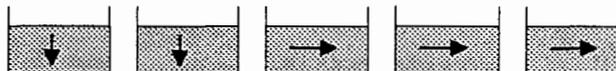
\*\* : Une seule unité opère à la fois. Elle reçoit donc, lorsqu'elle est en opération, N fois plus de débit que le débit moyen calculé sur la surface totale des unités de l'étage (ou N= Nombre d'unités/étage).

(Cooper, P. F., 1990 a)

TABLEAU 3.8

**DIMENSIONNEMENT DES SYSTÈMES HYBRIDES  
À SAINT-BOHAIRE, FRANCE**

PARAMÈTRES	ÉTAGE 1	ÉTAGE 2	ÉTAGE 3	ÉTAGE 4	ÉTAGE 5	TOTAL
1 Débit (m3/d) Type d'unité (horizontale ou verticale)	4 V	4 V	4 HSS	4 HSS	4 HSS	
2 Charge massique (kg DBO5/d)	1,148	0,578	0,348	0,212	0,152	
3 Nombre d'unités/étage	4	2	1	1	1	
4 Longueur d'une unité (m)	5	5	4	4	4	
5 Largeur d'une unité (m)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	
6 Superficie d'une unité (m2)	7,5	7,5	6	6	6	
7 Superficie totale de l'étage (m2)	30	15	6	6	6	63
Taux d'application hydraulique (m3/m2•d)						
8 — Par unité (1)/(7) *	0,55	0,55	0,67	0,67	0,67	
9 — Pour l'étage (1)/(8)	0,1365	0,269	0,67	0,67	0,67	0,065
Taux d'application massique (g DBO5/m2•d)						
10 — Par unité (2)/(7)/10 <sup>3</sup> *	153	77	58	35,3	25,3	
11 — Pour l'étage (2)/(8)/10 <sup>3</sup>	38,3	38,6	58	35,3	25,3	18,2
12 Taux d'enlèvement de la DBO5 (%)	50	40	39	28	26	90



\* : Une seule unité opère à la fois. Elle reçoit donc, lorsqu'elle est en opération, N fois plus de débit que le débit moyen calculé sur la surface totale des unités de l'étage (ou N= Nombre d'unités/étage).

(Cooper, P. F., 1990 a)

- les conditions à l'affluent incluant le taux d'application hydraulique ainsi que le taux d'application massique pour les paramètres de DBO<sub>5</sub>, MES, phosphore total, azote total ainsi que pour l'azote ammoniacal;
- les rendements obtenus pour les paramètres précités.

Le tableau 3.9 montre les charges et rendements des types de système pour l'enlèvement des bactéries. Le tableau 3.10 résume les performances de chacun d'eux.

### **3.3.2 Données disponibles**

Les valeurs présentées aux tableaux 3.2 à 3.10 proviennent des articles et documents publiés ainsi que, pour certains cas, de documents non publiés. Aucune évaluation des méthodes d'échantillonnage et de la procédure scientifique ne fut réalisée. La fréquence de cueillette de données est très variable et plusieurs bilans hydrauliques et massiques sont incomplets car ils ne tiennent souvent pas compte de l'évapotranspiration, des pertes par le sol et des apports par la pluie. Les débits et charges présentés sont des moyennes annuelles et, dans certains cas, des moyennes sur toute la période de données. Ces résultats ne tiennent pas compte des variations saisonnières.

La profondeur moyenne de ces systèmes est en général de 0,6 m.

Le taux d'application hydraulique fut calculé en répartissant le débit moyen sur la surface totale de l'unité. Considérant que la longueur d'écoulement et le type de sol influencent davantage la capacité hydraulique que la superficie, cette valeur peut être utilisée seulement comme indicateur général.

Les taux d'application massique et d'enlèvement massique pour la DBO<sub>5</sub>, les MES, l'ammoniac, l'azote total et le phosphore furent établis lorsque les données étaient disponibles. Ces taux d'application sont présentés en grammes par mètre carré de surface par jour.

### **3.3.3 Discussions sur les performances des systèmes horizontaux sous la surface (HSS)**

#### **A. Généralités**

Bien que les données recueillies permettent de confirmer une bonne performance globale des systèmes, une analyse beaucoup plus détaillée des différentes composantes serait nécessaire afin de mieux expliquer la grande variabilité des résultats. Notons entre autres:

**TABEAU 3.9**

**PERFORMANCES ET CHARGES DES SYSTÈMES DE TRAITEMENT  
 POUR L'ENLÈVEMENT DES BACTÉRIES**

LOCALISATION	COLIFORMES TOTAUX			COLIFORMES FÉCAUX			STREPTOCOQUES FÉCAUX		
	Entrée (n/100 ml)	Sortie (n/100 ml)	Facteur * d'enlèvement des bactéries	Entrée (n/100 ml)	Sortie (n/100 ml)	Facteur * d'enlèvement des bactéries	Entrée (n/100 ml)	Sortie (n/100 ml)	Facteur * d'enlèvement des bactéries
<b>HSS</b> — Othfresen (Allemagne) — MPophomeni (Israël) — Ingstrop (Danemark)	1 X 10E6 @ 1 X 10E7	1 X 10E4 @ 1 X 10E5	99	1 X 10E5	1 X 10E1 @ 1 X 10E2	2 X 10E3	—	—	—
	5,6 X 10E5	5,5 X 10E4	9,2	—	—	—	3,7 X 10E4	1,3 X 10E3	2,7 X 10E1
	2,4 X 10E7	9,2 X 10E2	2,6 X 10E4	2,8 X 10E6	3,5 X 10E2	8 X 10E3	—	—	—
	9,8 X 10E6	3,5 X 10E4	8,7 X 10E3	1,45 X 10E6	2 X 10E2	5 X 10E3	3,7 X 10E4	1,3 X 10E3	2,7 X 10E1
<b>HESE</b> — Arcata — Cobalt — Listowell 3 — Listowell 4	—	—	—	—	—	4	—	—	—
	—	—	—	1,62 X 10E5	6,72 X 10E3	2,3 X 10E1	5,5 X 10E4	7,7 X 10E4	-2,9 X 10E-1
	—	—	—	1,7 X 10E3	5,3 X 10E1	3,1 X 10E1	—	—	—
	—	—	—	2,2 X 10E5	1,2 X 10E2	1,8 X 10E3	—	—	—
	—	—	—	1,3 X 10E5	2,3 X 10E3	4,65 X 10E2	5,5 X 10E4	7,7 X 10E4	-2,9 X 10E-1
<b>HYBRIDE</b> — Oakland Park	2,31 X 10E6	6,8 X 10E2	3,4 X 10E3	—	—	—	2,2 X 10E4	25	8,8 X 10E2
	2,31 X 10E6	6,8 X 10E2	3,4 X 10E3	—	—	—	2,2 X 10E4	25	8,8 X 10E2
<b>FILTRE VERTICAL À SABLE CLASSIQUE</b> — Saint Symphorien de Lay	—	—	2,3 X 10E1	—	—	1,9 X 10E1	—	—	1,1 X 10E1
	—	—	2,3 X 10E1	—	—	1,9 X 10E1	—	—	1,1 X 10E1

\* : Le facteur d'enlèvement des bactéries exprime la proportion de bactéries enlevées (nb/100 ml) par rapport à la quantité restante.  $(nb \text{ bactéries à l'entrée} - nb \text{ bactéries à la sortie}) / (nb \text{ bactéries à la sortie})$

Exprimé autrement, il indique de combien de fois la quantité à l'entrée a été réduite par rapport à la sortie.

TABLEAU 3.9

PERFORMANCES ET CHARGES DES SYSTÈMES DE TRAITEMENT  
POUR L'ENLÈVEMENT DES BACTÉRIES (suite)

LOCALISATION	SALMONELLES			E. COLI		
	Entrée (n/100 ml)	Sortie (n/100 ml)	Facteur * d'enlèvement des bactéries	Entrée (n/100 ml)	Sortie (n/100 ml)	Facteur * d'enlèvement des bactéries
<b>HSS</b>						
— Othfresen (Allemagne)	1 X 10E4 @ 1 X 10E5	1	5 X 10E4	—	—	—
— MPophomeni (Israël)	—	—	—	1,6 X 10E5	3,4 X 10E4	3,7
— Ingstrop (Danemark)	—	—	—	—	—	—
	5 X 10E4	1	5 X 10E4	1,6 X 10E5	3,4 X 10E4	3,7
<b>HESE</b>						
— Arcata	—	—	—	—	—	—
— Cobalt	—	—	—	—	—	—
— Listowell 3	10	0	NA	—	—	—
— Listowell 4	228	0	NA	—	—	—
	119	0	NA			
<b>HYBRIDE</b>						
— Oakland Park	—	—	—	5 X 10E5	NIL	NA
				5 X 10E5	NIL	NA
<b>FILTRE VERTICAL À SABLE CLASSIQUE</b>						
— Saint Symphorien de Lay	—	—	—	—	—	—

\* : Le facteur d'enlèvement des bactéries exprime la proportion de bactéries enlevées (nb/100 ml) par rapport à la quantité restante.  $(\text{nb bactéries à l'entrée} - \text{nb bactéries à la sortie}) / (\text{nb bactéries à la sortie})$

Exprimé autrement, il indique de combien de fois la quantité à l'entrée a été réduite par rapport à la sortie.

TABLEAU 3.10

**SYNTHÈSE DES DIMENSIONNEMENTS ET PERFORMANCES  
DES DIFFÉRENTS SYSTÈMES**

PARAMÈTRES	HSS	HESE	HESF	Hybrides
Taux d'application hydraulique (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·d)	0,08 ± 0,05	0,067 ± 0,087	0,067 ± 0,019	0,088 ± 0,03
Taux d'application massique (g/m <sup>2</sup> ·d)				
— DBO5	11,3 ± 8,1	3,53 ± 4,5	1,74 ± 0,9	22,4 ± 5,9
— MES	7,14 ± 5,0	5,4 ± 6,3	3,03 ± 1,2	20,1 ± 4
— P (t)	0,91 ± 0,71	0,06 ± 0,06	—	—
— NH3-N	1,1 ± 0,12	1,9 ± 2,4	—	—
— N (t)	4,0 ± 2,91	0,18 ± 0,05	—	—
Taux d'enlèvement massique (g/m <sup>2</sup> ·d)				
— DBO5	8,7 ± 7,63	2,0 ± 2,2	1,2 ± 0,4	21,3 ± 6,9
— MES	5,83 ± 4,5	4,6 ± 5,4	2,85 ± 1,3	19,2 ± 4,6
— P (t)	0,45 ± 0,47	0,044 ± 0,054	—	—
— NH3-N	0,74 ± 0,33	0,42 ± 0,53	—	—
— N (t)	1,54 ± 1,26	0,1 ± 0,03	—	—
Temps de rétention hydraulique (d)	—	12 ± 10,5	24,2 ± 8,7	—
Rendements (%)				
— DBO5	75 ± 19	68 ± 18	91 ± 7	91,5 ± 2
— MES	78 ± 13	83 ± 11	86 ± 5	91 ± 1,4
— P (t)	39 ± 24	59 ± 24	87 ± 12	—
— NH3-N	36 ± 44,7	35 ± 28	—	—
— N (t)	45 ± 28	61 ± 28	—	—
Facteur d'enlèvement des bactéries (nb/100 ml) *				
— Coliformes totaux	8,7 X 10E3	—	—	3,4 X 10E3
— Coliformes fécaux	5 X 10E3	4,65 X 10E2	—	—
— Streptocoques fécaux	2,7 X 10E1	-2,9 X 10E-1	—	8,8 X 10E2
— Salmonelles	5 X 10E4	NA	—	—
— E. Coli	3,7	—	—	NA

\* : Le facteur d'enlèvement des bactéries exprime la proportion de bactéries enlevées (nb/100 ml) par rapport à la quantité restante.  

$$\frac{(\text{nb bactéries à l'entrée} - \text{nb bactéries à la sortie})}{(\text{nb bactéries à la sortie})}$$

Exprimé autrement, il indique de combien de fois la quantité à l'entrée a été réduite par rapport à la sortie.

- le type de sol;
- l'importance de la forme des systèmes;
- le mode et le type de contrôle de niveau d'eau à la sortie;
- la variation des débits et charges ponctuels et saisonniers;
- la variation des températures;
- l'état et le type de plante;
- les apports dus aux pluies;
- les pertes dues à l'évapotranspiration et au sol.

Le tableau 3.2 (pages 3-18 à 3-21) montre le dimensionnement et les performances de certains systèmes HSS existants. Rédigé à partir du manuel de pratique FD-16 de la W.P.C.F., modifié et complété à l'aide de résultats et performances cités dans la littérature, le tableau fournit les résultats de trente et un sites de traitement principalement situés en Angleterre, au Danemark, en Allemagne ainsi qu'aux États-Unis.

Les dimensions des systèmes sont très variables. Les surfaces d'élément épurateur varient entre 40 et 1 500 m<sup>2</sup>. Le cas spécifique de Othfresen, d'une superficie de 225 000 m<sup>2</sup>, est exceptionnel.

La longueur, dans le sens de l'écoulement des éléments épurateurs, varie de 4,24 à 100 m. La longueur des sites de Emittsburg 84-86 et de Hawkesbury est de 76 et 100 m respectivement. Ces valeurs sont anormalement élevées et dépassent de beaucoup celles normalement rencontrées qui varient de 3 à 35 m.

L'épaisseur du média filtrant varie de 0,46 à 1,0 m. La majorité des systèmes ont 0,6 m d'épaisseur.

### **B. Taux d'application hydraulique**

Le taux d'application hydraulique indique la quantité d'eau appliquée au système de traitement par unité de surface. Celui-ci varie de 17 à 201 l/m<sup>2</sup> de surface par jour. La moyenne des trente systèmes, si on exclut le site de Stretton où l'on observe une valeur du taux d'application hydraulique anormalement élevé de 500 l/m<sup>2</sup>·d, est de 80 l/m<sup>2</sup>·d. Un taux moyen d'application hydraulique de 80 l/m<sup>2</sup>·d est plus élevé que la valeur de 40 l/m<sup>2</sup>·d recommandée par les autorités européennes pour la conception.

### C. Charges massiques

Les concentrations en DBO<sub>5</sub> des affluents varient de 11 à 470 mg/l, de 30 à 205 mg/l en matières en suspension, de 2,8 à 35 mg/l en azote ammoniacal (NH<sub>3</sub>-N), de 14 à 112 mg/l en azote total et de 4,2 à 51 mg/l en phosphore total.

La qualité des effluents pour chacun des paramètres est relativement variable.

Le taux d'application de la DBO<sub>5</sub> varie de 5,5 g/m<sup>2</sup>·d à 35,7 g/m<sup>2</sup>·d. La moyenne est de 11,3 g/m<sup>2</sup>·d. La moyenne est plus élevée que le taux d'application recommandé par les instances européennes pour la conception établie à 8 g/m<sup>2</sup>·d (cette valeur a été obtenue à partir des deux ratios suivants, soit 5 m<sup>2</sup>/pers. équiv. et 40 g de DBO<sub>5</sub>/d·pers. équiv.).

Le taux d'enlèvement moyen de la DBO est de 8,7 g/m<sup>2</sup>·d avec un écart-type de 7,6 g/m<sup>2</sup>·d (0,6 à 32,7). Les rendements varient de 9 à 98,2% mais se trouvent généralement entre 50 et 90%. La moyenne d'enlèvement est donc de 74,6% pour les trente et un sites avec un écart-type de 19%.

Le taux d'application massique moyen des matières en suspension (MES) est de 7,1 g/m<sup>2</sup>·d. Celui-ci varie de 2,7 à 16,1 g/m<sup>2</sup>·d. Le taux moyen d'enlèvement des MES est de 5,8 g/m<sup>2</sup>·d et varie de 2,3 à 13,5 g/m<sup>2</sup>·d. Le rendement d'enlèvement est de 78% en moyenne.

Le taux d'application en azote ammoniacal (NH<sub>3</sub>-N) moyen est de 1,1 g/m<sup>2</sup>·d. Il varie selon les systèmes de 0,92 à 1,2 g/m<sup>2</sup>·d. Le taux d'enlèvement varie de 0,33 à 1,08 g/m<sup>2</sup>·d. Le taux d'enlèvement moyen est de 0,74 g/m<sup>2</sup>·d. Les rendements obtenus sur les différents systèmes sont très variables. Des rendements négatifs et quelquefois presque nuls indiquent bien la difficulté rencontrée pour l'enlèvement de l'azote ammoniacal. Ceux-ci sont normalement dus à un manque d'oxygène dans le milieu. L'enlèvement de l'azote ammoniacal est possible si des conditions aérobies sont maintenues dans le système.

Les taux d'application et d'enlèvement de l'azote total sont plus réguliers avec des moyennes respectives de 4 g/m<sup>2</sup>·d et de 1,54 g/m<sup>2</sup>·d. Le rendement moyen d'enlèvement de l'azote total est de 44,9%. Les rendements d'élimination de l'azote sont moins importants que ceux de la DBO<sub>5</sub> et des MES.

Le taux d'application moyen en grammes de phosphore par m<sup>2</sup>/d est de 0,91 alors qu'il varie de 0,086 à 2,8 g/m<sup>2</sup>·d. Le taux d'enlèvement moyen pour ces systèmes est de 0,45 g/m<sup>2</sup>·d, ce qui donne un rendement moyen d'enlèvement de 39,4%.

Le facteur d'enlèvement des bactéries exprime la proportion de bactéries enlevées (nb/100 ml) par rapport à la quantité restante.

$$\left( \frac{\text{nb de bactéries à l'entrée} - \text{nb de bactéries à la sortie}}{\text{nb de bactéries à la sortie}} \right)$$

Exprimé autrement, il indique de combien de fois la quantité à l'entrée a été réduite par rapport à la sortie.

Le facteur d'enlèvement moyen des coliformes totaux dans les systèmes HSS est de  $8,7 \times 10^3$  (nb/100 ml) pour un décompte moyen à l'effluent de  $2 \times 10^4$  nb/100 ml. Le facteur d'enlèvement des coliformes fécaux est de  $5 \times 10^3$  alors que les E. coli sont réduits par un facteur de 3,7 pour un décompte à l'effluent de  $3,4 \times 10^4$  pour le site de MPophomeni, Israël. Les salmonelles sont presque complètement éliminées pour les eaux de Othfresen.

### 3.3.4 Discussions sur les performances des systèmes à écoulement horizontal en surface avec plantes flottantes et/ou immergées (HESF)

Le tableau 3.3 (pages 3-22 à 3-24) montre les rendements et charges de quelques systèmes HESF existants. Les informations proviennent essentiellement des études effectuées par la compagnie "Lemna Corporation" qui détient une grande part du marché américain pour l'utilisation des lentilles d'eau (*Lemna minor*). Ces systèmes, au nombre de 7, sont tous situés aux États-Unis.

De superficies très variables, soit de 334 à 202 000 m<sup>2</sup>, les systèmes HESF sont souvent utilisés suite à une série d'étangs aérés, dans le but d'assurer le respect des normes de rejet en matière de phosphore et éviter la prolifération d'algues.

Le débit moyen des systèmes répertoriés varie de 13,25 à 17 000 m<sup>3</sup>/d et le volume utile entre 5 700 et 290 000 m<sup>3</sup>. Le temps de rétention hydraulique moyen est de 24,2 jours. Celui-ci est relativement plus élevé que celui des autres types de système de traitement. Il varie de 15 à 38 jours pour les sites observés. La profondeur d'eau moyenne des systèmes est approximativement de 1,5 m. Le système de Saint-Pannany Parish a une profondeur d'eau moyenne de 3,05 m. La mise en place des plantes flottantes à Saint-Pannany Parish a été effectuée en surface d'un étang existant, ce qui explique cette importante profondeur.

Le taux d'application hydraulique moyen des systèmes est de 67 l/m<sup>2</sup>·d. Les taux varient principalement entre 40 et 84 l/m<sup>2</sup>·d. Le site de Saint-Pannany Parish fut conçu, quant à lui, pour un taux beaucoup plus élevé que 528 l/m<sup>2</sup>·d.

Il est important de noter que le temps de rétention hydraulique est plus représentatif pour ces systèmes que le taux d'application hydraulique.

Les concentrations en DBO<sub>5</sub> à l'affluent des systèmes HESF sont très variables, soit de 13 mg/l à 240 mg/l. Les faibles concentrations à l'affluent indiquent un système HESF implanté en traitement tertiaire. Les concentrations à l'effluent sont habituellement inférieures à 15 mg/l, sauf pour le site de Sleepy Eye où la concentration à l'affluent était très élevée. Le taux d'application de la DBO<sub>5</sub> varie de 1,11 à 2,36 g/m<sup>2</sup>·d pour les sites répertoriés pour une moyenne de 1,74 g/m<sup>2</sup>·d. Le taux d'enlèvement du système HESF varie pour sa part de 0,91 à 1,51, pour une moyenne de 1,21 g/m<sup>2</sup>·d. Les rendements obtenus s'échelonnent de 64% (Devil's Lake) à 92,5% (Sleepy Eye) avec une moyenne générale de 92,1%.

Les concentrations à l'affluent pour les matières en suspension totales varient de 15 à 364 mg/l. Elles sont généralement sous les 15 mg/l et varient de 1 à 34 mg/l à l'effluent. Les taux d'application sont de 2,18 à 3,87 g/m<sup>2</sup>·d pour une moyenne de 3,3 g/m<sup>2</sup>·d. Le taux d'enlèvement des matières en suspension totales varie de 1,9 à 3,8 g/m<sup>2</sup>·d pour une moyenne de 2,85 g/m<sup>2</sup>·d. Les rendements sont relativement bons et varient de 81 à 98%, soit une moyenne de 89,2%.

L'enlèvement du phosphore par les systèmes HESF n'a été étudié qu'aux stations de Devil's Lake et Sleepy Eye. Les concentrations à l'affluent à Devil's Lake sont de 2,5 mg/l alors que celles à Sleepy Eye sont de 28 mg/l. Cette dernière valeur, excessivement élevée, est causée par la nature des eaux usées de procédé de l'usine Del Monte où l'on y effectue la mise en conserve de poires et de maïs. La concentration à l'effluent en phosphore total à Devil's Lake est de 0,1 mg/l. Les taux d'application et d'enlèvement sont respectivement de 0,21 et 0,2 g/m<sup>2</sup>·d pour un rendement de 96%. Le rendement du système de Sleepy Eye est pour sa part de 78,8%.

### **3.3.5 Discussions sur les performances de systèmes à écoulement en surface avec plantes émergentes (HESE)**

Neuf systèmes de traitement HESE ont été répertoriés principalement aux États-Unis et au Canada. La surface des systèmes varie de 360 m<sup>2</sup> à 210 000 m<sup>2</sup>. Les débits à l'entrée s'élèvent, quant à eux, de 17 à 1 477 m<sup>3</sup>/d, ce qui produit un taux d'application hydraulique variant de 7 à 241 l/m<sup>2</sup>·d pour une moyenne de 67 l/m<sup>2</sup>·d.

La profondeur moyenne des bassins est faible et varie de 0,3 à 1,08 m. Le temps de rétention hydraulique des eaux usées dans les bassins HESE est de 1,9 à 23,3 jours, pour une moyenne de 12 jours. Le site de Lake Coral 83-84 a, quant à lui, un temps de résidence hydraulique de 153 jours. Cette valeur extrême n'est pas retenue dans le calcul du temps de rétention hydraulique moyen.

Les concentrations à l'affluent des système varient de 11 à 140 mg/l. Encore une fois, plusieurs stations ont des concentrations faibles à l'entrée, car elles sont conçues pour le traitement tertiaire.

La concentration en DBO<sub>5</sub> à l'effluent des systèmes fluctue de 2,6 à 13,3 mg/l. Toutes les concentrations sont donc inférieures à 15 mg/l. Le taux d'application des systèmes HESE varie de 0,08 à 12,6 g/m<sup>2</sup>·d pour une moyenne de 3,5 g/m<sup>2</sup>·d. Le taux d'enlèvement de la DBO varie, pour sa part, de 0,07 à 6,38 g/m<sup>2</sup>·d pour un rendement moyen de 68% (49-95%). Les rendements pour les matières en suspension totales sont de 83,3%, pour l'azote ammoniacal de 35%, pour l'azote total de 61,3% et le phosphore total de 59%.

Les facteurs d'enlèvement moyens des bactéries dans les systèmes HESE sont légèrement moins bons que pour les systèmes HSS. La réduction des coliformes fécaux est de l'ordre de  $5 \times 10^2$  pour un décompte moyen à l'effluent de  $2,3 \times 10^3$ . Les résultats obtenus pour les streptocoques fécaux sont assez mauvais, avec un accroissement des streptocoques à l'effluent par un facteur de 1,4 fois la concentration à l'affluent. Dans certains systèmes en Australie, on attribue l'augmentation de matières fécales sur les systèmes à écoulement en surface à la présence d'oiseaux qui défèquent dans les marais.

Les salmonelles ont été complètement éliminées dans ce type de système.

### **3.3.6 Discussions sur les performances des systèmes hybrides**

Les résultats de performance de deux systèmes hybrides sont présentés aux tableaux 3.5 à 3.8 (pages 3-29 à 3-32). Ceux-ci furent sélectionnés, compte tenu de la quantité d'informations disponibles et parce qu'ils sont représentatifs de ce type de procédé. Le premier système est celui de Camphill Village à Oakland Park en Angleterre et le second celui de Saint-Bohaire en France (W.P.C.F., 1990, Burka, U. et al, 1990, Liénard, A. et al, 1990 a). Les tableaux 3.5 et 3.6 (pages 3-29 et 3-30) présentent la performance de chacun des étages des systèmes. On y détaille les concentrations à l'entrée et à la sortie de chacun des étages, le rendement pour l'étage lui-même et, finalement, le rendement total. Les caractéristiques dimensionnelles des systèmes sont présentées aux tableaux 3.7 et 3.8 (pages 3-31 et 3-32). On y fournit le type d'unité pour chacun des étages, ses caractéristiques dimensionnelles, le nombre d'unités par étage, les taux d'application hydraulique et massique en DBO<sub>5</sub> et le taux d'enlèvement de la DBO<sub>5</sub>.

Le système de Oakland Park est composé de cinq étages incluant des unités verticales pour les premier et deuxième étage, au troisième étage l'unité peut être utilisée soit horizontalement ou verticalement, un quatrième étage à écoulement horizontal sous la

surface ainsi qu'un cinquième étage avec écoulement en surface. Le nombre d'unités par étage et leurs superficies sont de:

- 6 unités pour le premier étage de 8 m<sup>2</sup> chacune;
- 3 unités pour le second étage de 5 m<sup>2</sup>;
- 1 unité pour le troisième étage de 8 m<sup>2</sup>;
- 1 unité pour le quatrième étage de 20 m<sup>2</sup>;
- 1 unité pour le cinquième étage de 90 m<sup>2</sup>.

La superficie totale est de 91 m<sup>2</sup> si on exclut le cinquième étage qui n'est pas retenu dans l'évaluation du rendement global. On observe une augmentation de plusieurs paramètres dans le dernier étage. Il ne fut pas considéré car il ne contribue pas ou très peu à la performance du système.

Le taux d'application hydraulique par unité verticale varie de 1,225 à 1,96 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·d. Le taux d'application massique est, quant à lui, de 18,4 à 300 g de DBO<sub>5</sub>/m<sup>2</sup>·d par unité verticale. Les unités verticales sont alimentées de façon séquentielle. Durant leur période d'exploitation d'une durée moyenne de deux jours, elles reçoivent toutes les eaux usées de l'affluent. Durant cette période, leur taux d'application hydraulique et massique est très élevé et correspond aux valeurs mentionnées ci-haut. Par la suite, une autre unité de l'étage est alimentée et la précédente mise au repos. C'est pourquoi le taux d'application sur une unité lorsqu'elle est en exploitation divisé par n (ou n = nombre d'unités pour cet étage) est égal au taux d'application moyen sur un étage.

Le taux d'application massique sur le quatrième étage à écoulement horizontal sous la surface est de 3 g de DBO<sub>5</sub>/m<sup>2</sup>·d et se trouve de beaucoup inférieur à ceux appliqués aux unités verticales.

Afin d'évaluer sommairement les besoins de superficies totales, nous avons calculé le taux d'application hydraulique sur la superficie totale du système excluant l'étage 5 à 0,11 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·d et le taux d'application massique sur l'ensemble à 26,5 g de DBO<sub>5</sub>/m<sup>2</sup>·d. Ces valeurs sont seulement indicatives mais permettent d'établir sommairement les superficies nécessaires pour un tel système.

Les concentrations à l'affluent sont relativement élevées alors qu'elles atteignent 246 mg/l pour la DBO<sub>5</sub>, 213 mg/l pour les MES, 58,2 mg/l pour l'azote ammoniacal ainsi que 8,04 mg/l pour les phosphates exprimés en P.

Au tableau 3.5 (page 3-29), on constate que les pourcentages d'enlèvement des étages verticaux sont habituellement supérieurs aux étages à écoulement horizontal sous la surface et à écoulement

en surface. Le rendement pour l'enlèvement de la DBO<sub>5</sub> varie de 58 à 81% sur chacun des étages, pour un rendement global de 99%. Le rendement pour l'enlèvement des matières en suspension est de 98%, alors que le rendement par étage varie de 48 à 82%. L'enlèvement de l'azote ammoniacal et des phosphates est toutefois plus faible avec des rendements globaux de 76 et 52% respectivement, alors que les rendements par étage varient dans le cas de l'azote ammoniacal de 6 à 67% et dans le cas des phosphates de 5 à 31%.

Le système de Saint-Bohaire (France) est composé de cinq étages ayant les caractéristiques suivantes:

- le premier étage est muni de quatre unités à écoulement vertical;
- le deuxième étage est muni de deux unités à écoulement vertical;
- les troisième, quatrième et cinquième étages sont composés d'une unité à écoulement horizontal sous la surface.

La superficie totale du système est de 63 m<sup>2</sup>.

Le taux d'application hydraulique des unités verticales était de 0,55 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·d et de 0,67 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·d pour les unités horizontales. Le taux d'application hydraulique moyen sur la superficie totale du système est de 0,65 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·d et le taux d'application massique de 18,2 g de DBO<sub>5</sub>/m<sup>2</sup>·d.

Les rendements obtenus pour le système hybride à Saint-Bohaire, enregistrés entre décembre 1983 et mars 1988, sont présentés au tableau 3.6 (page 3-30). Les concentrations à l'affluent sont encore une fois très élevées si on les compare à celles normalement mesurées au Québec et sont de 287 mg/l pour la DBO<sub>5</sub>, 272 mg/l pour les matières en suspension, de 64 mg/l pour l'azote Kjeldahl et de 43,6 mg/l pour l'azote ammoniacal. Le tableau 3.6 (page 3-30) montre la répartition des rendements selon les différents étages. Les rendements par étage sont variables et habituellement plus élevés pour les étages verticaux. Le rendement d'enlèvement de la DBO<sub>5</sub> est de 90% sur l'ensemble du système et varie de 26 à 50% selon l'étage. L'enlèvement global des matières en suspension est de 92%, celui de l'azote total Kjeldahl de 51% et celui de l'azote ammoniacal de 36,7%.

Plusieurs systèmes hybrides sont équipés d'un dernier étage à écoulement horizontal en surface. Celui-ci, en plus de présenter des performances médiocres, crée souvent des problèmes de croissance d'algues et de remise en solution de certains nutriments. Il faut donc éviter, à notre avis, de construire cet étage dans les systèmes hybrides. C'est pourquoi nous n'avons pas tenu compte des résultats du dernier étage à écoulement horizontal en surface du système de Oakland Park pour en évaluer les rendements.

Bien que le système de Saint-Bohaire ait fourni des rendements intéressants, plusieurs problèmes d'exploitation furent rencontrés. Les unités à écoulement horizontal sous la surface ont colmaté rapidement. Liénard recommande de ne pas construire ces dernières ou de prévoir un matériau plus grossier que le sable et gravier utilisés à Saint-Bohaire.

Les rendements du second étage vertical furent inférieurs à ceux escomptés. Cette situation est due à l'usage d'un matériau trop grossier qui occasionne une percolation trop rapide dans le média filtrant. Liénard suggère d'utiliser des matériaux plus fins au deuxième étage.

Les systèmes hybrides présentent généralement les meilleurs rendements de réduction des différents types de bactérie avec un facteur d'enlèvement des coliformes fécaux de  $3,4 \times 10^3$ , des streptocoques de  $8,8 \times 10^2$  et des E. coli. de l'ordre de  $10^5$ . Les décomptes à l'effluent pour les streptocoques et les E. coli. sont pratiquement nuls alors qu'ils sont sous la limite de  $10^3$  pour les coliformes totaux ( $6,8 \times 10^2$ ). La performance des systèmes hybrides, lorsque les besoins de désinfection sont importants, est très intéressante.

### 3.3.7 Comparaison des différents systèmes

Le tableau 3.10 (page 3-36) montre la synthèse des résultats pour chacun des quatre types de système de traitement (HSS, HESE, HESF et hybride).

Le taux d'application hydraulique moyen des systèmes horizontaux en surface est de  $67 \text{ l/m}^2 \cdot \text{d}$ , celui des HSS de  $80 \text{ l/m}^2 \cdot \text{d}$  alors qu'il est légèrement supérieur dans le cas des systèmes hybrides avec  $88 \text{ l/m}^2 \cdot \text{d}$ .

Le taux d'application massique en DBO des systèmes HSS est généralement plus élevé (de 3 à 6 fois) que les autres systèmes à écoulement horizontal en surface. Quant à eux, les systèmes hybrides peuvent accueillir des taux deux fois supérieurs aux systèmes HSS.

Bien que les charges massiques aux systèmes hybrides soient beaucoup plus élevées que pour les autres systèmes, leurs rendements sont supérieurs aux systèmes HSS et HESE. Seuls les systèmes HESF, très peu chargés, offrent les mêmes performances d'enlèvement de la  $\text{DBO}_5$ , soit 91%. Les systèmes HSS, quant à eux, ont des rendements moyens de l'ordre de 75%. Nous retrouvons le même phénomène pour l'enlèvement des matières en suspension.

Les performances obtenues pour l'enlèvement du phosphore total varient de 39 à 87% dans le cas des systèmes horizontaux. Aucune donnée n'est disponible pour les systèmes hybrides. Les

rendements pour l'enlèvement de l'azote ammoniacal et de l'azote total sont de 35 à 36% et 45 à 61% respectivement. Les systèmes hybrides existants n'ont pas démontré jusqu'à maintenant des rendements élevés pour l'enlèvement de ces paramètres.

Le temps de rétention hydraulique n'est pas répertorié pour tous les systèmes. Celui des systèmes à écoulement horizontal en surface avec émergentes est de douze jours, alors qu'il s'élève à vingt-quatre jours pour les systèmes à écoulement en surface avec plantes flottantes.

L'enlèvement des micro-organismes est également intéressant. Tous les systèmes ont des décomptes en coliformes fécaux sous la norme de 10 000 coliformes fécaux (100 ml) habituellement appliquée au Québec, et même généralement sous la norme de baignade qui est au Québec de 1 000 nb/100 ml. Les systèmes hybrides sont encore, sous cet aspect, plus efficace que les autres procédés.

Les résultats de Symphorien de Lay indiquent les rendements obtenus avec un filtre à sable vertical classique. Les facteurs d'enlèvement avec les marais artificiels sont de 10 à 100 fois supérieurs à ceux obtenus avec le filtre à sable seulement dans le cas de l'enlèvement des coliformes totaux et streptocoques totaux.

### **3.4 Principales variables de conception et d'exploitation à considérer**

La grande majorité de tous les systèmes implantés ont été construits sur une membrane imperméable les séparant du sol en place sauf quelques exceptions. Il est important d'imperméabiliser les unités avec une membrane d'argile ou une membrane synthétique afin de pouvoir contrôler les conditions d'humidité et d'assurer une bonne exploitation des systèmes de traitement.

Les systèmes construits jusqu'à maintenant ont des différences de conception et d'exploitation qui peuvent influencer substantiellement les performances. Le présent chapitre discute de ces différentes variables et traite de leur importance et de leurs effets.

Ces variables peuvent être regroupées sous trois volets, le tout tel que présenté au tableau 3.11. Le premier volet comprend les conditions externes qui doivent être considérées mais qui sont normalement hors de contrôle du concepteur. En second lieu, les différentes caractéristiques de conception des systèmes sont développées et, finalement, les paramètres d'exploitation incluant les éléments de contrôle disponibles.

#### **3.4.1 Caractéristiques des eaux usées**

##### **A. Type d'eaux usées**

La majorité des applications jusqu'à ce jour ont été réalisées pour traiter des eaux usées domestiques de petites agglomérations dont la population varie de 100 à 2 000 habitants. On retrouve, au Danemark, plus de 275 installations

TABLEAU 3.11

**Principales variables de conception et d'opération des procédés  
de traitement utilisant la filtration et les plantes**

CONDITIONS	VARIABLES	OPTIONS DÉJÀ EXPÉRIMENTÉES	COMMENTAIRES
• A • CONDITIONS EXTERNES	CARACTÉRISTIQUES DE L'AFFLUENT	<ul style="list-style-type: none"> <li>Eaux usées municipales</li> <li>Boues d'usine d'épuration (déshydratation)</li> <li>Industrie agro-alimentaire</li> <li>Industries pétrolières et minières</li> <li>Effluents agricoles</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Plusieurs expériences et systèmes de traitement pilote furent entrepris depuis 1983 environ.</li> </ul>
	CONDITIONS CLIMATIQUES —Températures —Ensoleillements —Précipitations —Vents	<ul style="list-style-type: none"> <li>Variables</li> <li>—Suède</li> <li>—Ontario</li> <li>—Grande-Bretagne</li> <li>—États-Unis (certaines régions froides)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>La majorité des expériences et des systèmes implantés à ce jour le furent dans des régions chaudes ou tempérées avec des courtes périodes de gel (plus chaudes qu'au Québec).</li> </ul>
• B • VARIABLES DE CONCEPTION	TRAITEMENT AMONT (PRÉTRAITEMENT)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dégrilleurs seuls</li> <li>Décanteurs primaires</li> <li>Fosses septiques</li> <li>Étangs ou lagunes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Le dégrillage est considéré essentiel (Liénard, 1991) et, dans la majorité des cas, une certaine décantation primaire est recommandée.</li> <li>Les systèmes de traitement furent utilisés le plus fréquemment en phase secondaire du traitement mais aussi quelquefois comme traitement tertiaire (Green, 1991).</li> </ul>
	DIRECTION D'ÉCOULEMENT	<ul style="list-style-type: none"> <li>Horizontale</li> <li>Verticale</li> </ul>	
	NIVEAU DE LA NAPPE D'EAU DANS LE SYS- TÈME DE TRAITE- MENT	<ul style="list-style-type: none"> <li>Drainé</li> <li>Sous la surface</li> <li>Près de la surface</li> <li>Submergé</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Le système doit être isolé du sol en place par une membrane imperméable.</li> </ul>
	TYPES DE PLANTES —Émergentes (1) —Flotantes (2) —Submergées (3)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Roseaux communs (<i>Phragmites communis</i>) (1)</li> <li>Quenouilles (<i>Typha</i>) (1)</li> <li>Joncs (<i>Scirpus américainus</i>, <i>Juncus marginatus</i>, <i>Juncus acuminatus</i>) (1)</li> <li>Lentilles d'eau (<i>Lemna</i>, <i>Spirodela</i>, <i>Wolffia</i>) (2)</li> <li>Hydrocotyles d'Amérique (<i>Hydrocotylus</i>) (2)</li> <li>Myriophylles à épis (<i>Myriophyllum heterophyllum</i>) (3)</li> <li>Élodées du Canada (<i>Elodea canadensis</i>) (3)</li> <li>Potamots (<i>Potamogeton</i>) (3)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ces espèces sont celles les plus communément utilisées.</li> <li>La majorité des systèmes sont composés de roseaux (<i>Phragmites communis</i>) seulement.</li> <li>Certains systèmes utilisent des lits de différentes plantes en séquence.</li> <li>Le marais artificiel comprend une multitude d'espèces.</li> </ul>
	GRANULOMÉTRIE ET TYPE DE SOLS	<ul style="list-style-type: none"> <li>Matières organiques</li> <li>Copeaux</li> <li>Tourbe</li> <li>Sable avec silt et argile</li> <li>Terre arable</li> <li>Sable</li> <li>Petit gravier (maximum 15 mm)</li> <li>Petite pierre nette</li> </ul>	
	COMPOSITION CHI- MIQUE DU SOL	<ul style="list-style-type: none"> <li>À base de silice</li> <li>À base de calcaire</li> <li>Comprenant des ions ferreux ou d'aluminium</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Les sols ayant une forte concentration en ions ferreux ou d'aluminium ont une capacité d'adsorption qui favorise l'enlèvement du phosphore et de certains métaux (Esser, 1989)</li> </ul>
	CHAÎNE DE TRAITEMENT	<ul style="list-style-type: none"> <li>En parallèle</li> <li>En série (séquence)</li> </ul>	
• C • PARAMÈTRES D'OPÉRATION	TYPE D'ALIMEN- TATION	<ul style="list-style-type: none"> <li>Continue</li> <li>Intermittente</li> <li>Par bachée</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>L'alimentation intermittente aide à augmenter l'aération du filtre et le rendement même dans des systèmes à écoulement horizontal (Geller, 1991).</li> </ul>
	RÉCOLTE DE PLANTES	<ul style="list-style-type: none"> <li>Oui</li> <li>Non</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>La majorité des procédés ne permettent pas la récolte des plantes sauf pour les systèmes avec lenticules.</li> </ul>

dont la grande majorité dessert moins de 2 000 habitants, jusqu'à un maximum de 7 100 habitants (Schierup, H. H. et al, 1990 c). La "Tennessee Valley Authority" aux États-Unis réalise actuellement des expériences utilisant des marais de type HSS afin de traiter les rejets de résidences isolées. Des expériences et quelques applications de ce procédé, ayant pour but l'enlèvement des toxines en industrie minière, furent réalisées par Kickuth en Allemagne (Kickuth, R.) ainsi qu'aux États-Unis (Frostman, T., 1991, Hedin, R. S., 1991, Gross, M. A. et al, 1991). Kickuth a construit un système HSS pour une brasserie en Autriche. Finalement, une expérience aux États-Unis (Hedin, R. S., 1991) fut effectuée pour traiter les eaux de ruissellement de surface d'une terre agricole.

En conclusion, à l'exception de quelques expériences ou applications, la majorité des systèmes en fonction actuellement ont été conçus pour traiter des eaux usées domestiques.

### **B. Concentration en DBO<sub>5</sub> des eaux usées**

L'apport en oxygène à ces systèmes n'étant pas contrôlé mécaniquement, une variation de la concentration en DBO<sub>5</sub> à l'affluent peut affecter le procédé de façon importante. À partir des résultats des tableaux 3.2 à 3.7 (pages 3-18 à 3-31), on constate que les concentrations sont très variées, soit de 70 à 370 mg/l pour les unités HSS, de 20 à 140 mg/l pour les unités HESE et jusqu'à 350 mg/l pour les systèmes hybrides. Les systèmes à écoulement en surface opèrent difficilement à des concentrations supérieures à 150 mg/l. Les systèmes à écoulement horizontal sous la surface peuvent opérer jusqu'à 370 mg/l mais une forte concentration risque de favoriser davantage des conditions anaérobies dans le système et d'occasionner son colmatage. La nitrification est difficile dans les systèmes HSS lorsque les concentrations en DBO<sub>5</sub> à l'entrée sont élevées. Les unités à écoulement vertical, en amont des systèmes hybrides, assurent un meilleur apport d'oxygène parce qu'ils opèrent en conditions non saturées (Watson, J.T. et al, 1991).

### **C. Variation des débits et charges**

La littérature disponible traite peu de la performance des systèmes face aux variations saisonnières et journalières de débits et charges. On retrouve de l'information relativement détaillée sur les variations mensuelles de quatorze systèmes au Danemark (Schierup, H. H. et al, 1990 c, Brix, H. et al, 1986). Les unités HSS peuvent accepter des surcharges de débits assez importantes. On observe alors un écoulement en surface mais les rendements demeurent généralement acceptables, principalement au niveau de la DBO et des MES. Les unités à écoulement vertical ont par contre une capacité maximale

d'infiltration qui va occasionner un débordement si celle-ci est dépassée.

#### **D. Conditions climatiques**

La majorité des systèmes existants opèrent dans des conditions climatiques moins rigoureuses que celles du Québec. Dans l'ensemble, les températures moyennes mensuelles pour les mois de janvier et février sont supérieures à 0°C. Au Danemark, où plusieurs unités à écoulement sous la surface furent implantées, la moyenne mensuelle de janvier et de février est de -4°C. En Suède, cette moyenne varie de -5 à -10°C et une unité verticale expérimentée par Wittgren (Wittgren, H.B. et al, 1990 a) a démontré de bonnes performances et aucun problème de gel à l'exception des conduites d'alimentation. Les expériences réalisées à Listowell et Cobalt, Ontario (Miller, 1990), sur des unités à écoulement en surface durant la période hivernale, dont les moyennes peuvent aller jusqu'à -10°C, ont soulevé plusieurs problèmes relativement à l'exploitation. Miller suggère que le niveau d'eau des systèmes à écoulement en surface soit relevé en hiver pour maintenir une épaisseur minimale sous le couvert de glace.

Ogden, du Southwest Wetland Group aux États-Unis (communication personnelle), a implanté des unités horizontales sous la surface qui sont opérationnelles à des températures moyennes mensuelles en hiver d'environ -10°C. Au Québec, les températures moyennes de janvier et février sont de -10°C dans les régions du SUD du Québec et de -15°C dans les régions nordiques habitées (Côte-Nord, Saguenay-Lac-Saint-Jean, Abitibi-Témiscamingue).

Dans les conditions hivernales du Danemark, les rendements durant la période hivernale sont semblables à ceux de la période estivale (Schierup, H. H. et al, 1990 c).

Il a été démontré que ces installations pouvaient demeurer opérationnelles pendant la période hivernale au Québec, lors d'une expérience réalisée à Lac Simon qui traite les eaux usées d'un petit motel (système HSS). Des unités à écoulement vertical localisées en aval d'étangs non aérés sont demeurées opérationnelles à Saint-Vianney au Québec.

L'aménagement des installations au Québec doit être adapté afin d'éviter les problèmes de gel mais l'ensemble des informations disponibles permet de confirmer qu'il est possible d'obtenir de bons rendements en période hivernale. Les premières installations au Québec devront être suivies et évaluées afin d'établir plus exactement les rendements durant les conditions hivernales.

### 3.4.2 Prétraitement

La majorité des systèmes analysés opèrent en traitement secondaire. Quelques expériences ont été réalisées, à Listowell en Ontario (Herskowitz, 1986) avec des systèmes HESE, et en Angleterre (Green, 1991) avec des systèmes HSS, pour utiliser ce type de procédé comme traitement tertiaire combiné à un système de boues activées, d'étangs aérés ou un disque biologique.

Lorsque ce procédé est utilisé comme traitement secondaire, il est généralement recommandé d'installer au moins un système de dégrillage (Liénard, 1991). Dans la majorité des cas, un décanteur primaire ou tout au moins une fosse septique est suggéré (Brix, 1991).

Liénard recommande l'utilisation de fosse septique ayant un temps de rétention relativement court (12 heures) afin d'éviter la création de conditions anaérobies et de diminuer les risques de mauvaises odeurs en surface des marais. Geller a utilisé, lors de ses expériences, un lagunage non aéré comme prétraitement (Geller, G., 1990 b). L'usage d'une fosse septique en prétraitement, pour permettre l'enlèvement des matières en suspension et des particules flottantes, permet d'atténuer les problèmes d'esthétique et de colmatage.

### 3.4.3 Types d'écoulement

Les unités à écoulement horizontal en surface ont le principal avantage de ne pas se colmater. Les plantes servent de support pour la croissance bactériologique. La profondeur d'eau dans ces unités doit être relativement faible afin de ne pas favoriser des conditions anaérobies trop importantes. En période hivernale, il est nécessaire de rehausser le niveau des systèmes afin d'éviter le gel sur toute l'épaisseur de ceux-ci. Ces unités sont difficiles à opérer durant l'hiver (W.P.C.F., 1990, Miller, 1990). Lorsque les charges organiques sont fortes, il est difficile de maintenir des conditions aérobies dans ce type de procédé.

Aux États-Unis principalement, les installations existantes occasionnent souvent des problèmes de prolifération de moustiques difficiles à gérer (W.P.C.F., 1990, Tennesen, K., 1991).

Les unités à écoulement horizontal sous la surface permettent d'éviter la croissance de moustiques car les larves ont besoin d'eau libre pour se développer. Les problèmes d'odeur y sont aussi beaucoup moins fréquents (W.P.C.F., 1990). La WPCF recommande l'usage de systèmes à écoulement sous la surface pour les petites installations et aux endroits où les conditions climatiques sont froides (W.P.C.F.).

Il est possible de contrôler le temps de résidence hydraulique dans ce type d'écoulement à l'aide de structures de contrôle de niveau à la sortie. De plus, ces unités se comportent relativement bien lors de surcharges hydrauliques qui peuvent occasionner, en certaines périodes, un écoulement en surface. Plusieurs expériences réalisées au Danemark (Brix, H. et al, 1986) ont permis de constater des rendements d'enlèvement en MES et en DBO acceptables même lorsque l'écoulement est en surface.

Lorsque le matériau filtrant est trop fin, un écoulement de surface est souvent observé sur ce type d'unité. Il est difficile de maintenir des conditions d'oxygénation dans l'ensemble du lit et les zones oxydantes sont souvent celles près de la surface et aux environs des racines tandis que le reste du lit est plutôt réducteur.

Il est possible de maintenir de bonnes conditions d'aération dans les unités verticales même lorsque les concentrations en DBO sont fortes (Cooper, P. F., 1990 a, CEMAGREF (Centre National du Machinisme Agricole du Génie Rural des Eaux et des Forêts), 1990). On maintient normalement, dans ces unités, des écoulements non saturés, ce qui favorise l'apport régulier d'oxygène et permet de maintenir des conditions aérobies plus facilement que dans les autres types d'unité. En effet, chaque unité est alimentée de façon intermittente sur une période d'environ deux jours puis elle est mise au repos pendant que les autres sont alimentées. De plus, il est recommandé, lors de l'alimentation d'une unité, d'acheminer les eaux usées sur la surface avec un fort débit sur de courtes périodes de 15 à 30 minutes et de cesser l'alimentation par la suite (alimentation par vagues successives). Ces méthodes d'alimentation favorisent l'évolution de conditions plus ou moins saturées dans le média filtrant et un apport d'oxygène.

Considérant l'alimentation irrégulière et les conditions périodiques non saturées du sol, les risques de gel de ce type d'unité sont plus élevés qu'une unité HSS, bien que des expériences en Suède et à Saint-Vianney au Québec à des températures froides en aient démontré qu'ils peuvent demeurer fonctionnels en période hivernale (Wittgren, H.B., 1990 a).

Dans une unité HSS, si le débit d'entrée excède la capacité du milieu filtrant, il y aura écoulement en surface du lit. Dans les systèmes à écoulements verticaux, cette situation occasionnera une accumulation d'eaux usées en surface du système et une conduite de trop-plein doit être installée pour éviter les débordements.

Ce type d'unité doit normalement être suivi d'unités à écoulement horizontal sous la surface qui permettent un polissage et un traitement de la partie carbonée lorsque les concentrations sont faibles.

#### 3.4.4 Types de plante utilisés

Les principales espèces de plante utilisées dans le traitement des eaux usées sont présentées au tableau 3.12 et sont toutes des plantes de marais. Une liste des végétaux de marais fréquemment rencontrés est présentée à l'annexe VIII. On y retrouve les plantes émergentes telles que la quenouille (*Typha sp.*), le roseau (*Phragmites australis*) et le jonc (*Juncus sp.*), les plantes flottantes telles que les lentilles d'eau (*Lemna minor*) ou lenticules (*Lemna sp.*), la jacinthe d'eau (*Eichornia crassipes*) et l'hydrocotyle d'Amérique (*Hydrocotyle umbellata*), ainsi que les plantes submergées telles que les myriophylles à épis (*Myriophyllum spicatum*), l'élodée du Canada (*Elodea canadensis*) et le potamot (*Potamogeton sp.*).

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

Par contre, lorsque le système est légèrement noyé (200 à 300 mm d'eau) en permanence, les conditions du milieu sont beaucoup plus favorables à la quenouille (*Typha sp.*) (Radoux, 1986). Si des profondeurs d'eau atteignent 1 m, le jonc (*Juncus sp.*) est alors favorisé.

Les plantes flottantes peuvent s'avérer intéressantes pour l'enlèvement du phosphore et de certains nutriments car leur croissance est très rapide et leur récolte relativement facile (Hancock, 1991). Le milieu doit être maintenu en surface libre avec des épaisseurs d'eau pouvant varier de 600 à 1 200 mm environ. Les principales plantes flottantes utilisées sont les lenticules (*Lemna sp.*) et la jacinthe d'eau (*Eichornia crassipes*). La croissance de cette dernière est toutefois limitée à des climats chauds, car elle ne résiste pas au gel (W.P.C.F., 1990).

Les plantes submergées ont normalement un rôle complémentaire et se retrouvent dans certains systèmes en combinaison avec d'autres plantes. Elles sont en général très sensibles à toute limite de passage de lumière et des concentrations en MES élevées peuvent ralentir de façon importante leur croissance (U.S.E.P.A., 1988).

#### 3.4.5 Récolte des plantes

La récolte des plantes fut expérimentée principalement pour assurer l'enlèvement de certains nutriments et métaux lourds. Geller a constaté un enlèvement du phosphore d'environ 10% par faucardage et ne recommande pas cette méthode pour assurer un bon

TABLEAU 3.12

PRINCIPALES ESPÈCES DE PLANTES UTILISÉES

TYPE DE PLANTES	NOM VERNACULAIRE	NOM SCIENTIFIQUE	PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DU POINT DE VUE TRAITEMENT DES EAUX USEES	RÉFÉRENCES	REMARQUES	
Plantes émergentes	Quenouille	<i>Typha sp.</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plante commune et rustique produisant une biomasse importante.</li> <li>• Reproduction rapide.</li> <li>• Conditions optimales de niveau d'eau entre 200-400 mm.</li> <li>• Système racinaire occupant l'horizon 0-300 mm dans le sol.</li> <li>• Résiste bien aux inondations prolongées.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Herskowitz</li> <li>•Desjardins 1989</li> <li>•Reid &amp; al</li> <li>•EPA 1988</li> <li>•WPCF 1990</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Moins de 10% du P peut être enlevé en procédant à une moisson régulière.</li> <li>• Population établie trois (3) mois après ensemencement selon Herskowitz.</li> <li>• Présente naturellement au Québec.</li> <li>• Moisson pour l'enlèvement des nutriments non rentables. Aspect économique de la moisson pour protection d'énergie et alimentation animale à étudier.</li> </ul>	
	Roseau (phragmite)	<i>Phragmites communis</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plante commune et rustique produisant une biomasse importante (120 cm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>).</li> <li>• Système racinaire occupant l'horizon 0-600 mm dans le sol.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•EPA 1988</li> <li>•Reid &amp; al</li> <li>•Desjardins 1989</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Efficacité moyenne de 50% mesurée pour l'enlèvement de P dans un marais en France: constitué de jonc et roseau.</li> <li>• Moisson non recommandée car la plante affaiblie à long terme (Liénard, 1991).</li> <li>• Présente naturellement au Québec.</li> <li>• Croît bien lorsque la nappe phréatique est près de la surface.</li> </ul>	
	Jonc		<i>Scirpus americanus</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plante commune et rustique.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•EPA 1988</li> <li>•Reid &amp; al</li> <li>•Desjardins 1989</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Voir remarques pour roseau.</li> </ul>
			<i>Juncus marginatus</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Système racinaire occupant l'horizon 0-760 mm dans le sol.</li> </ul>		
			<i>Juncus acuminatus</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Peut émerger sous 3 m d'eau.</li> </ul>		
	Iris		<i>Schoenoplectus</i>			
			<i>Iris virginicus</i>			
<i>Acorus</i>						
<i>Carex</i>						
		<i>Sparganium</i>				

TABLEAU 3.12

PRINCIPALES ESPÈCES DE PLANTES UTILISÉES (suite)

TYPE DE PLANTES	NOM VERNACULAIRE	NOM SCIENTIFIQUE	PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DU POINT DE VUE TRAITEMENT DES EAUX USÉES	RÉFÉRENCES	REMARQUES
Plantes flottantes	Lentilles d'eau	<i>Lemna sp.</i> <i>Spirodela sp.</i> <i>Wolffia sp.</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reproduction très rapide en période végétative.</li> <li>• Pouvant croître à une température aussi basse que 5°C.</li> <li>• Assure le contrôle de la croissance des algues par leur couverture.</li> <li>• Composition en P représente 0,6% du poids sec total.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• EPA 1988</li> <li>• WPCF 1990</li> <li>• Desjardins 1989</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Enlèvement du P peut être important s'il y a récolte fréquente (hebdomadaire) durant la période végétative.</li> <li>• Sensible à la dérive due au vent.</li> <li>• Structure requise pour limiter la dérive.</li> <li>• Effluent provenant de bassin recouvert de lentilles d'eau souvent en condition anaérobie.</li> </ul>
	Jacinthes d'eau	<i>Eichornia crassipes</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Peuvent permettre un bon enlèvement de P si elles sont récoltées régulièrement.</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ne croissent pas naturellement au Québec.</li> </ul>
	Hydrocotyle d'Amérique	<i>Hydrocotyle sp.</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Normalement une plante émergente avec racine ayant prise au sol, mais forme des structures flottantes lorsque les eaux sont riches en éléments nutritifs.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• WPCF 1990</li> <li>• EPA 1988</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utilisé en combinaison avec lentille d'eau.</li> </ul>
Plantes submergées	Myriophylle à épis	<i>Myriophyllum heterophyllum</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Oxygénation et support de nutriments sous l'eau.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desjardins 1989</li> <li>• Reid &amp; al</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plante submergée présente, sensibilité à toute limitation de passage de la lumière. (ex.: par croissance d'algues)</li> </ul>
	Élodée du Canada	<i>Elodea canadensis</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Idem.</li> </ul>		
	Potamot	<i>Potamogeton sp.</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Idem.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reid &amp; al</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Efficacité d'enlèvement de P de 25% et enlèvement de N de 70% d'un système potamot élodée du Canada cité dans la référence.</li> </ul>

enlèvement du phosphore (Geller, G. et al, 1990 a). Lorsque le roseau (*Phragmites australis*) est fauché régulièrement, il perd à long terme de la vigueur et les tiges deviennent plus petites et fragiles (Liénard, communication personnelle). De plus, l'humus et les plantes séchées qui s'accumulent sur le marais protègent ce dernier contre le gel et constituent une litière qui favorise la colonisation bactérienne en fournissant un support solide filtrant et léger et protège le système du gel en hiver.

Il n'est donc pas recommandé en général d'utiliser la récolte pour favoriser l'enlèvement des nutriments dans les systèmes à plantes émergentes. Par contre, la cueillette régulière des lenticules (*Lemna sp.*) peut permettre un enlèvement important du phosphore (Hancock, S. J. et al, 1991). Ces plantes croissent très rapidement et il peut être nécessaire de cueillir les lenticules (*Lemna sp.*) hebdomadairement pour assurer un bon enlèvement du phosphore. Lemna Corporation, aux États-Unis, a réussi à assurer de bonnes performances lorsque les surfaces disponibles sont grandes.

#### 3.4.6 Granulométrie du média

Pour les systèmes à écoulement dans le sol (verticaux et HSS), la granulométrie du média filtrant est très importante. Elle contrôle la capacité hydraulique du système et affecte de façon non négligeable les rendements.

Dans les unités verticales, on recommande la pose d'une couche de sable moyen uniforme en surface (Liénard, A. et al, 1990 a) et l'ajout de gravier de plus en plus grossier en profondeur. Par contre, durant la période d'alimentation, le débit doit être supérieur à la capacité d'infiltration du sable, ce qui favorise une répartition uniforme des eaux usées sur toute la surface de l'unité et contrôle le débit. L'écoulement dans le gravier se fait donc en condition non saturée et favorise une oxygénation de l'eau à traiter.

Dans les unités HSS, plusieurs granulométries ont été expérimentées à partir de média ayant un fort pourcentage en argile (jusqu'à 50%) jusqu'à la pierre nette. Une analyse de quatorze systèmes de traitement au Danemark a permis d'observer de l'écoulement de surface dans tous les systèmes qui avaient un certain pourcentage d'argile et seuls ceux composés de sable et gravier ou bien ceux dont la charge hydraulique était très faible n'avaient pas ce problème (Brix, H. et al, 1986). Les systèmes avaient en général entre 10 et 60% de silt et d'argile.

Tel que discuté précédemment, Kickuth considère que la capacité hydraulique du système, lorsque la colonie est mature (3 à 5 ans), est contrôlée par le réseau racinaire vivant et mort qui s'est développé dans le sol. Des expériences réalisées en Angleterre entre 1985 et 1990 ont permis d'observer une variation négligeable du coefficient de perméabilité même après cinq années de croissance des plantes (Cooper, 1990 c). Haberl, en Autriche, n'a observé aucune

amélioration majeure de la capacité hydraulique de ces systèmes dans le temps (Haberl, R. et al, 1990 b).

On recommande, en Angleterre, l'usage de petits graviers arrondis dont le diamètre est inférieur à 15 mm (Hobson, J. A., 1990). Des graviers anguleux ou de diamètre plus important perturbent la croissance des plantes (Cooper, 1990 a). Geller recommande l'usage d'une petite quantité d'argile afin de favoriser la déphosphatation. Le matériau devrait être composé de sable et petits graviers avec 5 à 10% d'argile. On doit s'assurer qu'il n'y ait pas de silt (Geller, 1990 a).

Lorsque l'adsorption du phosphore n'est pas recherchée, la composition chimique du sol a peu d'influence sur le rendement. Il est préférable d'utiliser des sols légèrement alcalins afin d'éviter un abaissement de pH.

Jusqu'à maintenant, les rendements d'enlèvement du phosphore sont erratiques et ne peuvent être assurés. Il est important de rendre disponibles des ions d'aluminium et de fer pour favoriser l'adsorption du phosphore. Lorsque les matériaux ayant une bonne proportion de fer sont disponibles, ceux-ci doivent être utilisés prioritairement, sinon l'usage de petites quantités d'argile permettent la mise en solution des ions d'aluminium et favorisent l'adsorption. Les sols fins avec un peu d'argile (5 à 10%) sont plus performants pour l'enlèvement du phosphore et de l'azote que les sols plus grossiers. Des sols granitiques sont très peu performants (Geller, G. et al, 1990 a). L'enlèvement du phosphore est favorisé si, dans un premier temps le milieu filtrant est réducteur, ce qui facilite la mise en solution des ions d'aluminium et de fer et que, dans un second temps, la précipitation est obtenue dans un milieu oxydant. Il est préférable de séparer dans l'espace le milieu réducteur du milieu oxydant plutôt que de fonctionner de façon séquentielle dans un même milieu, car on risque dans ce dernier cas de favoriser la remise en solution du précipité (Esser, D., 1989).

Lorsque l'enlèvement du phosphore n'est pas contraignant, le média filtrant devrait être un sable et gravier sans silt ni argile. Si une certaine déphosphatation est recherchée, les sols à forte composition en fer doivent être priorisés. Si ceux-ci ne sont pas disponibles, l'ajout d'argile en petites quantités (5 à 10%) peut être envisagé. L'usage de ce matériau a occasionné une multitude de problèmes dans les systèmes existants et des études plus approfondies seraient nécessaires avant d'envisager l'utilisation de ces matériaux pour la déphosphatation.

### **3.4.7 Chaîne de traitement utilisée**

Certains systèmes sont composés d'un seul champ alimenté en continu. Il est recommandé de construire au moins deux unités en parallèle pour permettre l'entretien, tout en maintenant l'exploitation du système. Afin d'assurer un certain temps de repos au filtre et une

meilleure aération, certains auteurs recommandent que les lits soient alimentés de façon séquentielle tour à tour (Geller, 1991).

Les systèmes hybrides sont généralement un peu plus complexes à construire et à opérer mais offrent une opportunité de gestion plus grande. En effet, lorsque les concentrations en DBO sont élevées, l'usage d'unités verticales en amont du traitement permet de faciliter l'oxygénation du milieu et la nitrification (Liénard, communication personnelle). Par la suite, l'ajout d'unités HSS assure un polissage, une dénitrification et une digestion complémentaires de la fraction carbonée de façon aérobie et anaérobie.

Bien que plusieurs systèmes aient été construits avec des unités à écoulement en surface en fin de traitement, l'analyse des résultats permet souvent d'observer une remise en solution des nutriments et une croissance de micro-organismes (Burka, U. et al, 1990).

La chaîne de traitement doit donc être sélectionnée et dépend principalement des caractéristiques de l'affluent et des objectifs de rejet.

#### **3.4.8 Pente de la surface des unités HSS**

Dans la majorité des cas, les unités HSS sont à surface horizontale. Il est cependant difficile de construire des unités parfaitement horizontales et on observe fréquemment des rigoles qui occasionnent des courts-circuits (Brix, communication personnelle). En Angleterre, certains systèmes ont été construits avec une légère pente de la surface dans le sens de l'écoulement, ce qui a augmenté les problèmes de ravinement et créé un court-circuitage plus important (Hobson, J. A., 1990). De plus, lorsque la différence de niveau est relativement importante ( $\pm 300$  mm), il devient difficile d'avoir un bon niveau pour la croissance des plantes sur toute la surface.

Geller suggère que la pente de la surface soit ascendante de l'affluent vers l'effluent (Geller, G. et al, 1990 a). Une pente de 0,5 à 2%, avec une différence de niveau maximale de 100 mm, permet d'atténuer les problèmes de formation de rigoles et donc de courts-circuits et force le passage de l'eau dans le sol.

#### **3.4.9 Pente du fond des unités HSS**

Dans la majorité des cas, le fond des unités HSS est horizontal. Une légère pente descendante dans le sens de l'écoulement permettra d'augmenter la capacité hydraulique du système.

#### **3.4.10 Épaisseur du média**

##### **A. Pour les unités HSS**

Les unités HSS construites jusqu'à maintenant ont normalement une profondeur de 600 mm. Celles-ci correspondent à la profondeur qu'atteignent normalement les racines du roseau (*Phragmites australis*). Au Danemark, plusieurs installations ont été

construites jusqu'à des profondeurs de 1 200 mm dont voici quelques exemples:

PROFONDEUR (MM)

Moesgård	Entrée 600 mm — Sortie 1 200 mm
Hjordkzer	600 mm
Ingstrup	1 200 mm
Rugballegård	1 200 mm
Lunderskov	—
Knudby	1 200 mm
Borup	1 200 mm
Kalø	1 000 mm
Egeskov	500 mm couche de croissance des plantes
Bredballegård	1 200 mm
Ferring	1 000 mm
Fousing	1 200 mm
Stenhøj	1 000 mm
Østjyden	1 200 mm

(Brix et Schierup, 1986)

Les résultats présentés par Brix n'ont pas permis d'établir de relations entre les rendements, les capacités hydrauliques et la profondeur des systèmes étudiés. Bien que l'établissement de la profondeur optimale de ces types d'unité reste à établir et que la pratique courante recommande 0,6 m, nous suggérons que certains systèmes soient conçus avec une profondeur de 0,7 m à l'affluent et 0,9 m à l'effluent. La capacité hydraulique d'un tel système est augmentée de façon importante et serait donc mieux adaptée aux conditions hydrauliques québécoises.

### ***B. Pour les unités verticales***

Les unités verticales ont normalement une épaisseur variant entre 800 à 1 200 mm. La première couche de sable a une épaisseur d'environ 100 mm suivie d'une couche de gravier ou sable graveleux d'environ 700 mm et une couche drainante de pierre nette au fond. Il est important que les médias filtrants sélectionnés soient conformes à la théorie des filtres pour éviter le déplacement de particules d'une couche vers l'autre.

#### **3.4.11 Méthode d'alimentation**

L'alimentation intermittente consiste à fournir un débit durant une période de temps et assurer une période de repos par la suite. Par exemple, certains systèmes à écoulement vertical sont munis de quatre unités en parallèle sur un même étage. Chaque unité est alimentée en eaux usées pendant une période de deux jours et est par la suite en repos pour une période de six jours. De plus, dans certains cas, l'alimentation en eaux usées n'est pas continue mais plutôt par vagues successives, c'est-à-dire une alternance de courtes périodes à très forts débits suivies de courtes périodes d'arrêt. Les

périodes d'alimentation à débits importants permettent de couvrir les installations d'eaux usées et les périodes d'arrêt assurent l'infiltration dans le média filtrant sans nécessairement fournir une période de repos aux filtres.

Les unités HSS opèrent normalement en alimentation continue. Par contre, Geller suggère de réaliser une alimentation intermittente de ces unités et a constaté de meilleurs résultats dans ces conditions (Geller, G., 1990 b). L'alimentation intermittente des unités peut permettre une variation du niveau d'eau dans le média filtrant et favoriser une certaine oxygénation du milieu. Il n'est pas facile d'opérer de cette façon avec les unités HSS, car les périodes d'arrêt devraient être longues et une augmentation des débits durant l'alimentation occasionnerait un surdimensionnement des systèmes. La solution serait avantageuse mais difficilement applicable.

Les unités à écoulement vertical doivent être alimentées de façon intermittente pour assurer l'assèchement de la couche de sable de surface et éviter qu'elle ne soit colmatée par des bactéries anaérobies (Burka, U. et al, 1990). La période de repos permet de drainer le gravier et assure un apport d'air dans le média. Liénard recommande, de plus, une alimentation par vagues successives afin d'assurer une bonne répartition de la charge hydraulique sur toute la surface de l'unité (Liénard, A. et al, 1990 c). La capacité hydraulique de ces unités est beaucoup plus grande que les HSS.

#### **3.4.12 Contrôle de niveau à la sortie**

La majorité des unités HSS sont équipées de systèmes manuels de contrôle de niveau à la sortie. Ces ouvrages permettent de contrôler la croissance de mauvaises herbes et le développement des racines. Le rehaussement du niveau au-dessus de la surface, principalement au printemps, permet d'éviter la croissance d'autres graminées qui peuvent compétitionner avec le roseau (*Phragmites australis*). Un abaissement important du niveau favorise une croissance des racines vers le fond du système (Hobson, J. A., 1990).

De plus, il est possible d'augmenter le temps de résidence hydraulique lorsque les débits sont faibles en rehaussant l'ouvrage de contrôle. Un abaissement de celui-ci permet d'augmenter la capacité hydraulique et d'aérer le milieu.

Les unités à écoulement vertical doivent normalement opérer en milieu non saturé et le niveau d'eau à la sortie doit être maintenu bas. Par contre, il est important, là encore, d'avoir un équipement de contrôle de niveau pour gérer la croissance des mauvaises herbes et éviter les problèmes liés au gel.

### 3.5 Rôle des principales composantes du procédé

Les marais artificiels et naturels comptent deux composantes ayant un rôle majeur dans le procédé de traitement, soit les plantes et les micro-organismes. Les systèmes à écoulement sous la surface comportent une troisième partie fondamentale, le média filtrant. Nous présentons, au tableau 3.13, une synthèse des rôles principaux de chacune de ces composantes et, au tableau 3.14, leur importance relative pour l'enlèvement des différents contaminants de l'eau usée. Chacune des composantes est traitée plus en détail dans ce qui suit:

#### 3.5.1 Les plantes

Tel que discuté précédemment, plusieurs types de plante peuvent être utilisés pour le traitement de l'eau usée. Dans les systèmes à écoulement dans le sol, la croissance des racines des plantes émergentes fournit un apport en oxygène durant la journée (Brix, 1990 b). L'oxygène se trouve très près des racines et rhizomes jeunes et permet une certaine oxygénation des eaux usées (Brix, Schierup, 1990 b).

On observe actuellement une divergence d'opinion importante entre différents auteurs dont certains considèrent l'apport en oxygène par les plantes important (Kickuth, R., 1990), tandis que d'autres reconnaissent l'apport d'oxygène par les plantes mais le considèrent de moindre importance que les apports par diffusion et convection (Brix, H. et al, 1990 b).

Les plantes utilisent, pendant leur croissance, une certaine quantité d'azote et de phosphore et peuvent, dans certains cas, consommer et concentrer dans leurs tiges et leurs feuilles certains métaux lourds. La quantité d'azote et de phosphore pouvant être enlevée directement par les plantes émergentes est très faible (5 à 10%), en autant qu'il y a fauchage régulier (Geller, 1990 a). Par contre, l'enlèvement du phosphore à partir de plantes flottantes telles que les lenticules (*Lemna sp.*) (Hancock, 1991) et les jacinthes d'eau (*Eichornia crassipes*) s'est avéré efficace dans plusieurs cas (U.S.E.P.A., 1988). Le tableau 3.15 fournit la capacité potentielle d'enlèvement de certains éléments par les lenticules (*Lemna sp.*). Ces données ont été fournies par la compagnie Lemna Corporation qui a évalué la capacité théorique d'emménagement des différents éléments et a déterminé le taux d'enlèvement potentiel sur la base d'une bonne croissance et d'une récolte régulière des lenticules (*Lemna sp.*). La cueillette des plantes est nécessaire pour éviter la remise en solution des nutriments et favoriser la croissance de nouvelles pousses qui consomment les nutriments principalement durant leur développement. Pour les conditions de température froides, la lenticule (*Lemna sp.*) étant plus résistante s'avère la plus intéressante (U.S.E.P.A., 1988, Hancock, 1991).

L'évapotranspiration favorisée par les plantes peut, dans certains climats, rendre les écoulements à l'effluent très faibles.

TABLEAU 3.13

*Fonctions des principales composantes du procédé*

ÉLÉMENTS DE PROCÉDÉ	PRINCIPALES FONCTIONS	REMARQUES
PLANTES	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maintient la capacité hydraulique du sol.</li> <li>• Apport d'oxygène au sol.</li> <li>• Consommation des nutriments (N, P, etc...).</li> <li>• Support de bactéries.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- par le développement des racines et des rhizomes.</li> <li>- démontré principalement pour les roseaux (<i>Phragmites australis</i>), mais les autres plantes émergentes telles que typha et juncus ont cette propriété;</li> <li>- seulement durant le jour;</li> <li>- seulement près des racines;</li> <li>- en hiver, l'apport est assuré mécaniquement par effet de Venturi (Brix, 1991).</li> <li>- surtout en période de croissance des plantes;</li> <li>- lorsque le besoin des plantes est satisfait, elles n'en consomment plus;</li> <li>- la récolte permet d'assurer un certain enlèvement de nutriments;</li> <li>- certaines plantes consomment beaucoup de phosphore (ex.: lentilles d'eau, algues, jacinthes d'eau, etc...).</li> <li>- autour des racines ou des tiges.</li> </ul>
MICRO-ORGANISMES	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Enlèvement de la DBO.</li> <li>• Nitrification/Dénitrification.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- peuvent être fixés dans le sol ou en surface;</li> <li>- bonne efficacité même en hiver (diminution d'efficacité de 25% environ).</li> <li>- si on réussit à créer des conditions séquentielles aérobies et anaérobies;</li> <li>- l'efficacité diminue beaucoup en hiver.</li> </ul>
SOL	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Enlèvement des MES.</li> <li>• Enlèvement de nutriments (phosphore) et de certains métaux par adsorption.</li> <li>• Support des bactéries.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- efficace lorsque le média est fin (sable).</li> <li>- possible si le média est composé en partie d'ions ferreux, d'aluminium ou autres pouvant favoriser l'adsorption;</li> <li>- plus la capacité d'adsorption est comblée et moins l'enlèvement des nutriments sera efficace à long terme.</li> <li>- un développement trop important de bactéries, surtout anaérobies, peut colmater le lit filtrant.</li> </ul>

TABLEAU 3.14

**ROLE ÉPURATOIRE DES DIFFÉRENTES COMPOSANTES  
IMPLIQUÉES DANS LE PROCESSUS DE TRAITEMENT**

COMPOSITION DU MARAIS	PARAMÈTRES	MES	DBO	N	P	MÉTAUX LOURDS	BACTÉRIES PATHOGÈNES
Rôle des plantes		O	O	+	+	++	O
Rôle du sol		+++	O	+	++	++	++
Rôle des micro-organismes		+	+++	++	+	O	+
Interaction Plantes — Sol		++	+	++	O	+	+
Interaction Plantes — Micro-organismes		O	++	++	O	O	+
Interaction Sol — Micro-organismes		+	++	+	O	O	+

O: Nul  
+: Léger  
++: Moyen  
+++ : Fort

TABLEAU 3.15

**TAUX D'ENLÈVEMENT POTENTIEL DE CERTAINS ÉLÉMENTS  
PAR UN SYSTÈME AVEC LENTICULES**

*(Lemna minor)*

ÉLÉMENTS	TAUX D'ENLÈVEMENT (g/m <sup>2</sup> an)
Phosphore	700
Azote	5 450
Fer	710
Chlorure	940
Sulfure	580
Sodium	350
Potassium	2 250
Calcium	5 000
Cuivre	2
Zinc	6
Manganèse	80
Magnésium	700
Chrome	5
Aluminium	2 300
Arsenic	5
Mercuré	1

(Lemna Corporation, 1991)

### 3.5.2 Le sol

Dans les systèmes à écoulement en surface, le rôle du sol est négligeable. Par contre, lorsque les eaux usées passent au travers du média, celui-ci permet d'effectuer un bon enlèvement des matières en suspension et de la partie organique associée. Lorsque le média filtrant a une bonne capacité d'adsorption, il pourra permettre l'accumulation du phosphore si les conditions sont favorables. Pour ce faire, il faut que des ions de fer ou d'aluminium soient disponibles (Esser, D., 1989).

### 3.5.3 Les micro-organismes

Les micro-organismes ont un rôle essentiel à jouer dans tous les systèmes de traitement d'eaux usées à partir des plantes. Qu'ils soient aérobies ou anaérobies, ce sont eux qui consomment la partie carbonée des eaux usées pour la transformer principalement en CO<sub>2</sub> pour les bactéries aérobies et aussi en méthane pour les bactéries anaérobies (Brix, 1991).

Lorsqu'il est possible de maintenir des conditions séquentielles aérobies et anaérobies, les bactéries nitrifiantes vont transformer l'azote ammoniacal en nitrites et nitrates dans les zones aérées et les bactéries dénitrifiantes vont permettre la transformation des nitrates et nitrites en azote gazeux dans les zones anaérobies (Liénard, 1991).

Les micro-organismes créent, de plus, des floccs biologiques qui facilitent la sédimentation des particules et ont donc un rôle non négligeable à jouer sur l'enlèvement des MES, principalement dans les systèmes à écoulement en surface.

### 3.5.4 Le complexe plantes — sol

Le rôle de chacune des composantes est souvent plus important dans un contexte synergique avec les autres composantes que prises individuellement. En effet, le sol est essentiel pour supporter la croissance des plantes émergentes et fournit une partie de la nourriture nécessaire à la croissance de ces dernières, à moins qu'il s'agisse d'une culture hydroponique. Dans ce dernier contexte, il peut alors être nécessaire d'ajouter au système certains éléments nutritifs tels que le potassium pour maintenir les plantes en santé.

Dans les systèmes de traitement qui nécessitent le passage de l'eau usée au travers du sol, les rhizomes et racines des plantes émergentes jouent un rôle très important dans le maintien de la capacité hydraulique du sol (Kickuth, R., 1990). En effet, leur activité mécanique permet de déplacer le sol et de briser les tapis colmatants. La mort des racines favorise le développement de tunnels qui facilitent l'écoulement à plus long terme.

### **3.5.5 Le complexe plantes — micro-organismes**

Tel que précisé précédemment, les plantes, par leur apport en oxygène, peuvent favoriser la croissance de certains micro-organismes aérobies à la proximité de leurs rhizomes et racines. Elles offrent un support physique pour la croissance des bactéries.

Les micro-organismes dégradent la matière organique et favorisent sa minéralisation pour rendre disponible ces minéraux pour la consommation des plantes. Le complexe micro-organismes — plantes joue un rôle important dans l'épuration des eaux usées mais son fonctionnement n'est pas complètement connu.

### **3.5.6 Le complexe sol — micro-organismes**

Les bactéries croissent sur le média filtrant dans les systèmes à écoulement dans le sol et ce dernier permet d'augmenter la concentration en micro-organismes et, ainsi, améliorer le rendement du système par superficie unitaire (Kickuth, R., 1990). Les micro-organismes aérobies auront tendance, à long terme, à diminuer la capacité hydraulique du sol mais ne sont normalement pas responsables du colmatage. La croissance trop importante de bactéries anaérobies peut occasionner un colmatage complet du milieu filtrant. L'apport d'oxygène extérieur à l'aide des plantes, par diffusion ou par convection afin de maintenir un minimum d'oxygène, demeure donc important. Les micro-organismes transforment les composés phosphorés organiques complexes en composés inorganiques plus simples, comme les orthophosphates qui sont plus facilement précipités.

Comme on peut le constater, les différentes composantes du procédé opèrent en symbiose et il n'est pas possible de différencier indépendamment le rôle de chacune. La sélection du média filtrant peut avoir un impact non négligeable sur la croissance des plantes. Bien que ces systèmes soient relativement simples à concevoir et à opérer, l'écosystème responsable du traitement est très complexe et les phénomènes biologiques et chimiques impliqués sont très variables et interdépendants (Radoux, 1991 d).

## **3.6 Phénomènes impliqués pour l'enlèvement des contaminants**

Le présent chapitre va traiter de la capacité épuratoire des différents systèmes et des aspects ayant une influence substantielle sur les rendements.

### **3.6.1 Matières en suspension (MES)**

Bien que certains systèmes opèrent sans prétraitement, il est fortement recommandé d'installer un élément de traitement primaire permettant d'enlever les matières flottantes et les matières décantables (Brix, 1991). La mise en place d'une fosse septique avant traitement permettra, d'une part, d'enlever jusqu'à 60% des matières en suspension et 40% de la DBO<sub>5</sub> tout en régularisant le

débit arrivant au marais et, d'autre part, de diminuer les risques de colmatage.

Dans les systèmes à écoulement en surface, les matières en suspension sont enlevées par sédimentation sous l'effet de la formation de floccs biologiques. La croissance d'algues peut diminuer les rendements d'enlèvement des MES (Hancock, 1991). Le maintien d'une surface ombragée avec des plantes émergentes ou des plantes flottantes atténue la croissance d'algues et permet de maintenir de bons rendements d'enlèvement pour les MES (80 à 90%) (Hancock, Radoux).

Les systèmes à écoulement dans le sol, que ce soit horizontal ou vertical, offrent de très bons rendements d'enlèvement des MES pouvant varier de 90 à 95% lorsque le média filtrant est bien choisi et qu'il n'y a pas de court-circuitage. En général, l'usage d'un média sableux assure une très bonne filtration. Dans les systèmes à écoulements horizontaux, l'enlèvement des matières en suspension demeure élevé même si la granulométrie du média filtrant peut atteindre de 10 à 15 mm (Cooper, P. F., 1990 a).

Tel que présenté au tableau 3.14 (page 3-61), l'enlèvement des MES est surtout conditionné par la granulométrie du sol en place pour les systèmes à écoulement dans le sol. L'interaction entre les plantes et le sol est importante pour éviter le colmatage et les micro-organismes jouent un rôle important dans la formation de floccs biologiques, surtout pour les systèmes à écoulements horizontaux en surface.

### **3.6.2 Demande biochimique en oxygène (DBO)**

La demande biochimique en oxygène est normalement exprimée en demande biochimique en oxygène à cinq jours (DBO<sub>5</sub>). Cette mesure est généralement reconnue et représente, pour des eaux usées domestiques, environ les 2/3 de la DBO ultime. La fraction particulaire de la DBO<sub>5</sub> est enlevée de façon physique, soit au niveau du prétraitement ou par filtration et sédimentation dans les lits de plantes.

La digestion de la fraction carbonée peut être aérobie, anaérobie ou mixte. Dans les systèmes à écoulement en surface, la partie supérieure est normalement en condition aérobie. Il existe une zone intermédiaire en condition anoxique et, souvent, le fond du bassin est dans des conditions anaérobies. La digestion peut donc être réalisée par les deux types de bactérie. La digestion anaérobie produit moins de boues que la digestion aérobie mais peut occasionner des problèmes d'odeur dus à la libération de méthane et de H<sub>2</sub>S. Pour éviter ces problèmes, il faut que l'épaisseur d'eau soit relativement faible (souvent inférieure à 600 mm) (U.S.E.P.A., 1988).

Dans les systèmes à écoulement horizontal sous la surface, les eaux usées traversent en principe des zones aérobies près des racines et rhizomes et anaérobies ailleurs dans le média filtrant (Kickuth, 1990).

Lorsque les conditions hydrauliques sont maintenues, la digestion de la fraction carbonée est très bonne.

L'activité des micro-organismes est plus lente en hiver et les rendements pour l'enlèvement de la DBO<sub>5</sub> ont tendance à diminuer durant cette période. La synthèse de réaction est la même que dans le cas de systèmes d'étangs aérés ou de boues activées. On peut s'attendre à des rendements d'enlèvement variant de 85 à 95% durant la période estivale et de 70 à 80% durant la période hivernale. La respiration endogène diminue plus rapidement que la synthèse avec la température. On doit donc s'attendre à observer une augmentation de la flore bactérienne durant la période hivernale. L'activité biologique étant plus lente, la consommation en oxygène est réduite et il est peu probable que les risques de colmatage soient plus grands durant l'hiver.

L'enlèvement de la DBO<sub>5</sub>, à partir de systèmes à écoulement vertical dans le sol, offre de très bons résultats, en autant que l'alimentation soit intermittente pour permettre une bonne aération du média filtrant et éviter le colmatage. Lorsque la concentration en DBO est élevée, ce type d'unité est recommandé, car il est plus facile d'assurer un apport d'oxygène suffisant pour la digestion aérobie. Les séquences d'alimentation-séchage doivent être écourtées durant l'hiver afin d'éviter le gel de l'eau usée dans les conduites d'alimentation. Les conduites d'alimentation des unités à écoulement vertical situées en aval des étangs non aérés à Saint-Vianney, comté de Matapédia, ont gelé au début de la première période d'exploitation. Les séquences d'alimentation ont été réduites à environ 2 heures par unité et les problèmes de gel ont été résolus.

Tel que précisé précédemment, l'enlèvement de la DBO<sub>5</sub> est assuré par une biodégradation à partir des micro-organismes aérobies ou anaérobies. Les plantes et le sol n'ont pas d'influence directe sur l'enlèvement de la DBO<sub>5</sub> mais indirecte en favorisant la croissance des micro-organismes. De plus, les plantes fournissent une proportion de l'oxygène nécessaire (Radoux).

### **3.6.3 Azote (N)**

L'azote à la sortie de la fosse septique est principalement sous forme d'ammoniac (NH<sub>4</sub>), car les formes protéiniques sont surtout associées aux MES et colloïdes qui sont restés dans la fosse septique avec les boues. Certains chercheurs ont tenté d'éliminer l'ammoniac sans nécessairement diminuer de façon importante l'azote total. Ce procédé consiste à oxyder l'ammoniac qui est transformé par les bactéries nitrifiantes en NO<sub>2</sub> et NO<sub>3</sub>. Les rendements d'enlèvement de l'azote total (Kjeldahl) varient énormément d'un système de traitement à l'autre et, pour un système donné, évoluent beaucoup dans le temps. Les trois phénomènes suivants peuvent permettre la réduction de l'azote et, compte tenu de l'importance de leur rôle dans un système de traitement donné, l'effet

sur les rendements à court, moyen et long terme peut varier énormément (Wittgren, 1988).

Le premier phénomène consiste en une adsorption chimique de l'azote dans le sol. Ce type de réaction ne peut être rencontré dans un système à écoulement en surface. Il nécessite un sol légèrement alcalin, un temps de rétention très long et la présence d'ions ferreux ou d'aluminium pour faciliter la transformation chimique et la fixation de l'azote. Ce phénomène n'est normalement pas dominant (Wittgren, 1988).

Le deuxième phénomène impliqué est une nitrification et dénitrification par l'activité des micro-organismes. Pour enlever l'azote de façon biologique, il est nécessaire de créer des zones séquentielles dans le temps ou dans l'espace aérobie et anaérobie. Une première étape aérobie permet de transformer l'azote ammoniacal en nitrates et nitrites et une seconde étape anoxique permet de favoriser la croissance de bactéries dénitrifiantes qui transforment les nitrates et nitrites en azote gazeux et conservent l'oxygène pour leur métabolisme. Les bactéries impliquées dans ce procédé sont sensibles aux variations de température et deviennent inopérantes lorsque la température de l'eau est aux environs de 3 à 5°C. Wittgren a obtenu de bons résultats avec des températures d'eau relativement froides (jusqu'à 4°C).

Bien qu'un système à écoulement horizontal en surface puisse avoir des zones aérobies et anaérobies, il est difficile d'assurer une bonne séquence de ces conditions et la gestion de la nitrification-dénitrification dans ce type de système est difficile. Certaines expériences (Radoux, M., 1989) réalisées en Belgique ont permis d'obtenir de bons taux d'enlèvement de l'azote dans des systèmes à écoulement horizontal en surface (près de 70%).

Les systèmes à écoulement horizontal sous la surface permettent une certaine activité de nitrification-dénitrification, compte tenu des zones aérobies et anaérobies dans le milieu, mais la gestion et le contrôle de ce type de système demeurent difficiles et les résultats obtenus sont très variables d'une installation à l'autre (Cooper, 1989).

Il est plus facile de gérer les séquences d'oxydation et de réduction dans un système à écoulement vertical étagé (Liénard, 1991). Il est en effet possible de maintenir des conditions oxydantes dans le premier étage et d'assurer des conditions réductrices dans le second.

Les plantes consomment une certaine quantité d'azote lors de leur croissance. Même avec une récolte régulière, cette consommation demeure négligeable et ne permet pas de réduire l'azote de façon substantielle.

Le phénomène le plus intéressant à favoriser pour l'enlèvement de l'azote est la consommation à partir des micro-organismes.

### 3.6.4 Phosphore (P)

L'enlèvement du phosphore à partir de systèmes de traitement utilisant les plantes est relativement difficile et les résultats obtenus sont très variables (Esser, 1989). L'enlèvement du phosphore peut impliquer deux phénomènes différents, soit l'adsorption par le sol et la consommation par les plantes.

Pour obtenir un enlèvement intéressant du phosphore par adsorption par le sol, la présence d'ions ferreux et/ou d'aluminium est importante. Afin d'optimiser la capacité d'adsorption du sol, il est préférable de maintenir des conditions réductrices à pH acide, dans un premier temps, qui permettront de solubiliser les ions ferreux et d'aluminium. La figure 3.7 montre d'ailleurs le champ de stabilité du fer ferreux ( $\text{Fe}^{+2}$ ), du fer ferrique ( $\text{Fe}^{+3}$ ) et des hydroxydes de fer en fonction du pH et du potentiel d'oxydoréduction. Par la suite, des conditions oxydantes favoriseront leur association chimique avec le phosphore et leur précipitation de façon stable (Esser, 1989). Un sol légèrement alcalin favorisera l'adsorption et évitera la remise en solution du phosphore en maintenant le pH légèrement basique. Il y a précipitation du phosphore par le fer lorsque celui-ci se trouve sous forme ionique. C'est le cas en milieu réduit, lors de la précipitation et cristallisation de la vivianite [ $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 + 8 \text{H}_2\text{O}$ ]. Il peut aussi avoir précipitation et cristallisation de la strengite ( $\text{Fe PO}_4 \times 2 \text{H}_2\text{O}$ ) en milieu oxydant, lorsque des ions  $\text{Fe}^{+3}$  sont libérés en présence de phosphore suite à un changement des conditions du milieu ou à la décomposition microbienne des composés organiques. La figure 3.8 montre le champ de stabilité des phosphates de fer et des oxyhydroxydes de fer en fonction du potentiel d'oxydoréduction du pH et des activités ioniques du phosphore.

Certaines réactions chimiques sont réversibles à court terme et une modification du pH ou de l'alcalinité du sol peut occasionner une remise en solution du phosphore (Esser, 1989). D'autres réactions plus stables peuvent difficilement être inversées et permettent une accumulation du phosphore dans le sol. La première réaction est de l'adsorption, celle-ci est rapide et réversible. Une seconde réaction consiste en la diffusion intérieure des adsorbants. Celle-ci est lente et peu réversible. Le potentiel d'oxydoréduction doit être supérieur à 200 mV pour oxyder le fer et favoriser la précipitation. Si le milieu devient en condition anoxique, il peut y avoir remise en solution du phosphore. Pour éliminer le phosphore, il faut la présence de 0,08 à 0,16% de fer par an environ dans le substrat, soit de 0,8 à 1,6% pour une période de 10 ans ou 4 à 8% pour une période de 50 ans. Les sols naturels contiennent entre 0,2 et 20% d'oxyhydroxyde de fer, ce qui représente de 0,1 à 14% de fer. Il est donc possible de trouver des sols naturels qui permettent un enlèvement de phosphore sur une période relativement longue ( $\pm 20$  ans).

Bien entendu, la capacité d'adsorption du sol est limitée. Bien que la capacité d'adsorption théorique de certains sols utilisés pour le traitement des eaux usées ait été démontrée pour des périodes de

FIGURE 3.7

Champs de stabilité de  $Fe^{3+}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $\alpha$  -  $FeOOH$  et  $Fe_3O_4$  (en pointillés de  $Fe(OH)_3$ ,  $Fe_3(OH)_8$ , et  $Fe(OH)_2$ ), en fonction du potentiel d'oxydoréduction et du pH pour une activité de  $10^{-5}$  mole/l

Source: Esser 1989

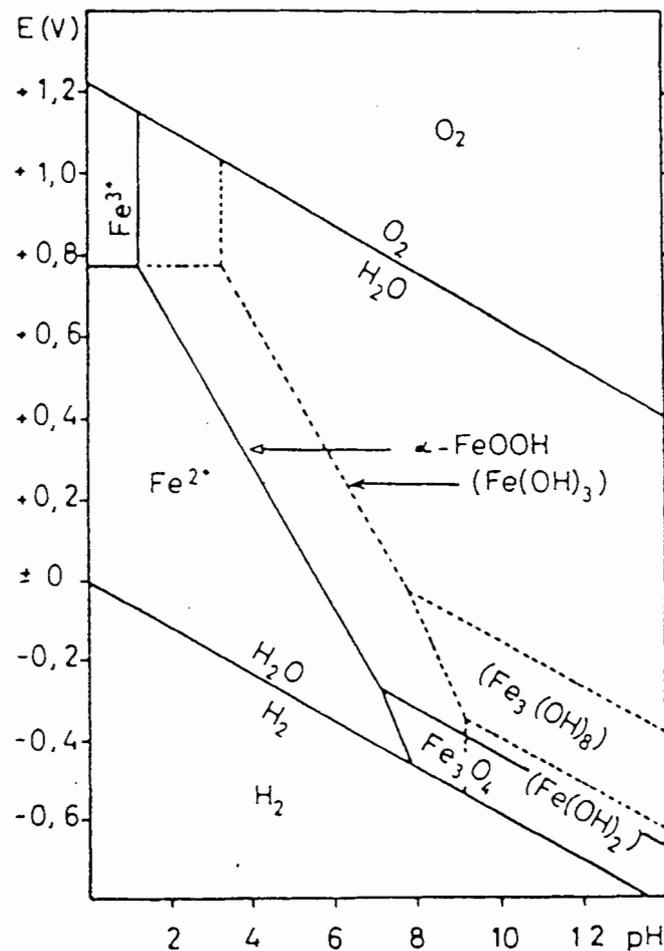
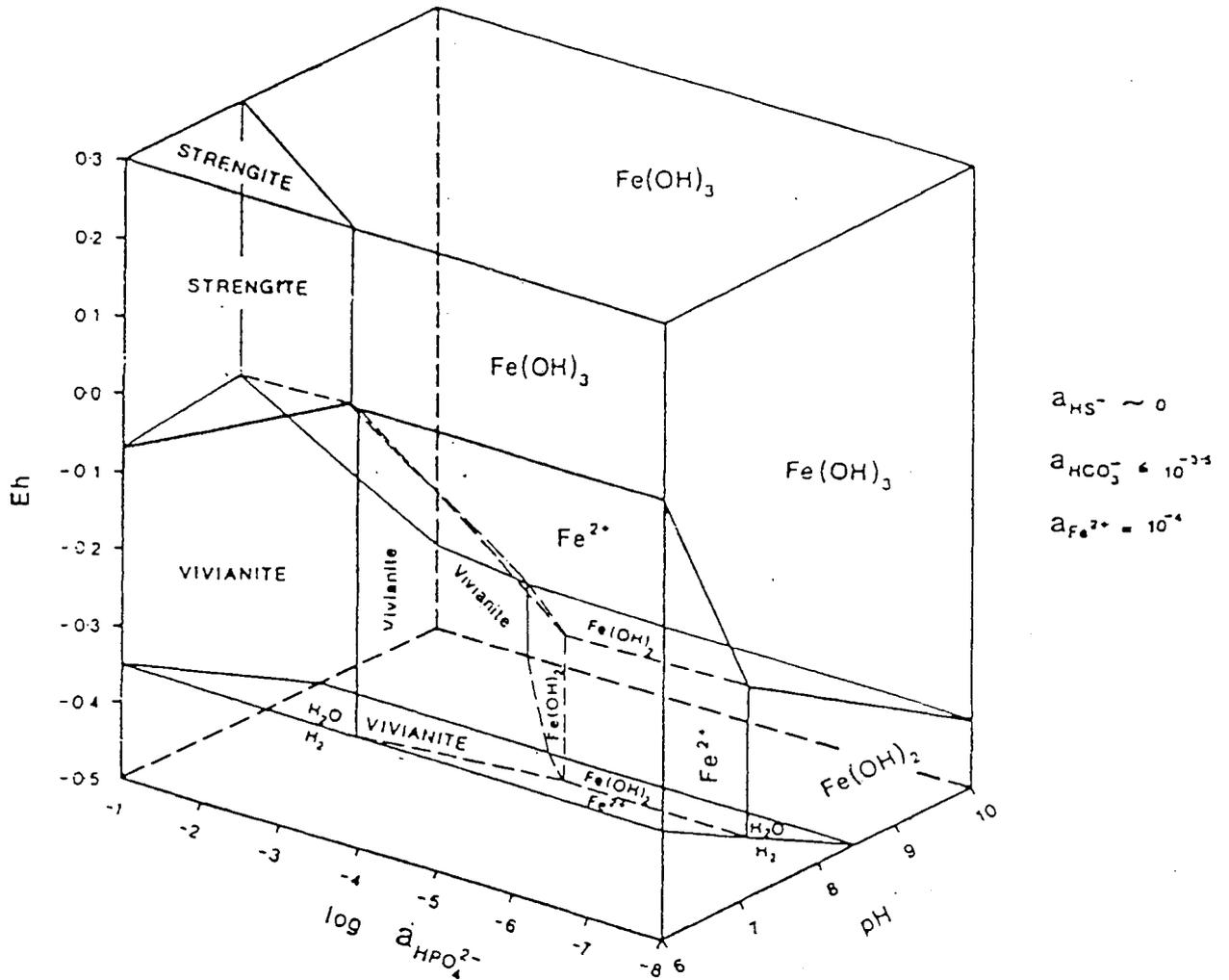


FIGURE 3.8

Champs de stabilité des phosphates de fer et des oxyhydroxydes en absence de H<sub>2</sub>S, en fonction du potentiel d'oxydoréduction, du pH et des activités ioniques du phosphore

Source: Esser, 1989



plus de cinquante ans (Kickuth, 1990), il est en principe difficile d'assurer un contact uniforme et complet entre l'eau et les particules de sédiment et les écoulements préférentiels risquent de diminuer cette période de temps (Brix, 1987 b). Selon Kickuth, ce contact est assuré par la croissance des nouvelles racines dans le milieu.

Plusieurs auteurs (Kickuth, 1990, Geller, 1990 a) ont tendance à incorporer de l'argile dans le média filtrant afin de favoriser l'adsorption du phosphore, mais la présence d'argile doit être très bien dosée pour éviter qu'elle ne diminue de façon trop importante la conductivité hydraulique du média filtrant. Bien entendu, le phénomène d'adsorption ne peut être rencontré que dans des systèmes où le passage de l'eau est dans le sol.

Le phénomène d'adsorption du phosphore est mieux compris et plus rapide que celui de l'azote et certains systèmes ont démontré une bonne performance d'enlèvement du phosphore.

D'autre part, certaines plantes consomment une quantité appréciable de phosphore lors de leur croissance. Elles peuvent emmagasiner celui-ci dans les racines et rhizomes, les tiges et les feuilles. Une forte proportion du phosphore est emmagasinée par les plantes émergentes dans leurs racines lors de la fanaison (Brix, 1990 b). Il s'avère donc nécessaire de les faucher idéalement avant la fanaison pour assurer un enlèvement définitif du phosphore. Plusieurs expériences ont démontré que même avec fauchage, cette procédure enlève une faible proportion du phosphore (5 à 10%).

Par contre, certaines plantes flottantes telles que les lentilles d'eau (*Lemna minor*) peuvent être envisagées avantageusement pour l'enlèvement du phosphore. Il faut prévoir des surfaces relativement importantes et une récolte hebdomadaire durant la période de croissance pour obtenir de bons résultats. Bien entendu, l'efficacité d'enlèvement du phosphore, selon cette méthode, n'est opérationnelle que durant la période de croissance des plantes (Hancock, 1991). Il est possible, selon Lemna Corporation, d'enlever 700 grammes de phosphore par mètre carré par année de croissance (tableau 3.15, page 3-62).

Il est donc possible d'enlever le phosphore dans des systèmes à écoulement dans le sol par adsorption et le rôle et la composition chimique de ce dernier sont primordiaux. Des systèmes à écoulement en surface, composés de plantes flottantes récoltées régulièrement, peuvent aussi offrir de bons rendements.

### 3.6.5 Micro-organismes pathogènes

La réduction des micro-organismes pathogènes, comme les coliformes fécaux, est possible dans ces systèmes de traitement selon certaines conditions. Pour ce faire, il est important de créer une zone de polissage qui n'est pas favorable à la croissance des micro-organismes et d'éviter les courts-circuits. Dans les systèmes à

écoulement horizontal en surface, il est possible de réduire de  $10^2$  à  $10^3$  coliformes par 100 ml si le temps de rétention est suffisamment long et s'il n'y a pas de court-circuit (Radoux, 1989). Souvent la qualité de l'effluent diminue beaucoup dans ces types de système lorsque les variations de débit à l'entrée sont importantes. Les systèmes à écoulements horizontaux sous la surface permettent d'abaisser les concentrations en micro-organismes de  $10^2$  à  $10^4$  coliformes par 100 ml et sont moins sensibles aux variations de débit (Kickuth, 1990, Geller, 1990 a).

Plusieurs systèmes étagés se terminent par un lagunage composé d'une multitude de plante. On observe fréquemment une augmentation des micro-organismes dans cette lagune (Liénard, communication personnelle).

En règle générale, ces types de procédé ont démontré une bonne efficacité d'enlèvement des bactéries pathogènes mais il est tout de même rare d'obtenir des concentrations inférieures à 1 000 coliformes par 100 ml.

### 3.6.6 Métaux lourds

Bien que l'enlèvement des métaux lourds soit de peu d'intérêt dans le cadre de cette étude, plusieurs systèmes de traitement d'eaux usées à lit de roseaux (*Phragmites australis*) à écoulement horizontal sous la surface ont été utilisés avec succès pour l'enlèvement de différents rejets industriels chargés métaux lourds (Kickuth, 1990).

## 3.7 Limitations des procédés et principaux problèmes rencontrés

Les principaux problèmes de conception et d'exploitation rencontrés dans ce type de procédé seront discutés dans ce chapitre. Après avoir décrit le problème, nous traiterons de ses impacts, des facteurs qui les provoquent et des correctifs envisageables.

### 3.7.1 Colmatage

#### A. Description

Les lits à écoulement horizontal sous la surface et à écoulement vertical doivent être conçus afin que leur conductivité hydraulique permette le passage de tous les débits pouvant être acheminés à la station d'épuration. La conductivité hydraulique à long terme et tous les gradients hydrauliques envisageables, compte tenu des différentes conditions d'exploitation, doivent être envisagés (Cooper, 1990 a). Il est, de plus, très important que l'alimentation soit uniformément répartie pour profiter de la capacité hydraulique de l'ensemble du lit (Cooper, 1990 a). Pour ce faire, une alimentation par vagues successives peut être avantageuse (Geller, 1990 b). Si tous ces critères de conception sont adéquats, il est tout de même possible d'observer un colmatage du filtre à moyen terme. Celui-ci peut être composé de matières

solides et fibreuses déposées à la surface du média filtrant (Mettetal, 1991) ou être formé d'un matelas de bactéries colmatantes anaérobies.

Bien entendu, les systèmes à écoulement horizontal en surface ne risquent pas d'avoir de problème de colmatage.

### **B. Impact**

S'il y a colmatage d'un système à écoulement horizontal sous la surface, on observe un écoulement en surface et souvent non uniforme. Le temps de rétention des eaux usées diminue de façon appréciable et les rendements en enlèvement des MES et de la DBO<sub>5</sub> diminuent (Brix, 1991) aussi bien que ceux de coliformes, d'enlèvement de phosphore ou d'azote. Dans un système à écoulement vertical, le colmatage empêche complètement l'exploitation du système et peut occasionner des débordements.

### **C. Causes possibles**

Dans la majorité des cas, le colmatage des lits filtrants est occasionné par un manque d'oxygène et la croissance trop importante de bactéries anaérobies (Liénard, 1990 a). Il est également possible qu'un mauvais fonctionnement de l'élément de prétraitement occasionne une surcharge massique en surface du filtre.

### **D. Correctifs possibles**

Si le colmatage est en surface, un fauchage et un raclage de la surface du filtre peuvent permettre de récupérer la capacité hydraulique. Autrement, il est recommandé de cesser l'exploitation du filtre et de le laisser reposer sur une période pouvant aller de 2 à 6 mois. Par la suite, le maintien des conditions aérobies peut être favorisé par une alimentation intermittente du système ou par une diminution de la charge organique (Liénard, 1990 a).

## **3.7.2 Écoulements préférentiels**

### **A. Description**

Le temps de rétention réel de l'eau usée est souvent beaucoup plus court que celui prédit par la théorie. En effet, il se crée régulièrement des cheminements préférentiels tant au niveau des systèmes à écoulement en surface que dans le sol (Brix, 1986). Plusieurs expériences ont démontré des temps de rétention hydrauliques de 2 à 4 fois inférieurs à la valeur théorique (Schierup, 1990 a) (Brix, H. et al, 1986). Le niveau de la nappe phréatique dans le média filtrant est souvent très près de la

surface et une forte proportion de l'eau usée peut s'écouler en surface dans des rigoles préférentielles.

Dans les systèmes verticaux, il est possible qu'une seule partie du système soit utilisée et qu'une autre zone demeure asséchée si l'alimentation n'est pas uniforme (Liénard, 1991).

Dans un système à écoulement en surface, on peut observer des corridors d'écoulement où la majorité de l'eau s'écoule.

### **B. Impact**

Les problèmes de courts-circuits diminuent le temps de rétention de l'eau usée dans le système, empêchent souvent un contact uniforme avec le sol et les plantes et affectent le rendement global du traitement autant au niveau des MES, de la DBO<sub>5</sub> que de l'azote et du phosphore.

### **C. Causes possibles**

Dans les systèmes à écoulement horizontal en surface, la végétation croît souvent de façon non uniforme et favorise la création de chemins préférentiels.

Dans les systèmes à écoulements horizontaux sous la surface, une végétation mal développée ou la présence de cavités en surface (mauvais réglage) peuvent favoriser la formation de rigoles qui vont acheminer un fort pourcentage du débit (Schierup, 1990 a). Si la surface du lit est légèrement inclinée, une section du lit sera surutilisée (Brix, 1991). De plus, si le matériau est de granulométrie non uniforme, le passage de l'eau sera favorisé dans les endroits où la conductivité est plus élevée.

Dans les systèmes à écoulement vertical, les problèmes de court-circuit peuvent être occasionnés par une alimentation mal répartie ou par une granulométrie non uniforme du média.

### **D. Correctifs possibles**

Pour les systèmes à écoulement en surface (HESE), il est suggéré de réaliser des conceptions en corridor. De plus, il est préférable d'atteindre un bon étalement de la végétation avant de passer d'importants débits pour éviter la formation de canaux préférentiels (Radoux, 1990 a).

Dans les systèmes à écoulement horizontal sous la surface (HSS), le réglage du sol est très important et la constitution d'une légère pente inverse à la direction d'écoulement permet d'éviter la formation de rigoles et favorise une meilleure répartition du débit (Geller, 1991). Là aussi, la végétation doit être bien implantée avant de permettre le passage de forts débits

(Brix, 1991). Il faut normalement attendre le temps nécessaire aux jeunes repousses de bien s'enraciner (2 à 3 mois).

Finalement, le matériau utilisé doit être bien mélangé et uniforme.

Liénard suggère que les unités à écoulement vertical soient alimentées par des vagues successives importantes qui vont assurer un étalement de l'eau usée sur l'ensemble de la surface du filtre et assurer l'usage de l'ensemble du média filtrant.

### **3.7.3 Croissance de mauvaises herbes ou difficulté de croissance des plantes**

#### **A. Description**

Les systèmes de traitement utilisant les plantes sont, dans la majorité des cas, conçus avec des lits monospécifiques à l'exception de l'usage de marais naturels. Il est très important de sélectionner le type de plante qui est le mieux adapté aux conditions d'exploitation prévues. Par exemple, un système dont le niveau de la nappe phréatique dans le média filtrant est près du sol sera favorable aux roseaux (*Phragmites australis*), un système opérant avec 200 à 300 mm d'eau facilitera la croissance des quenouilles (*Typha sp.*) tandis qu'un système dont la profondeur d'eau est légèrement supérieure sera plus favorable pour les joncs (*Juncus sp.*) (U.S.E.P.A., 1988). La sélection des plantes mal adaptées aux conditions d'exploitation peut donc occasionner la suppression des plantes implantées par d'autres espèces mieux adaptées.

Même si la sélection des plantes est adaptée aux conditions d'exploitation, il est possible que des graminées croissent dans les systèmes de traitement surtout lors de la période de démarrage (Cooper, 1990 a).

#### **B. Impact**

S'il y a croissance d'autres graminées dans les systèmes plantés de roseaux (*Phragmites australis*), les rendements et les conductivités hydrauliques seront diminués.

#### **C. Causes possibles**

La présence de graminées dans les systèmes de traitement indique souvent un problème d'assèchement des lits sur de trop grandes périodes. Si le sol n'est pas horizontal, il peut y avoir la formation de zones plus humides et plus sèches qui vont favoriser la croissance de certaines plantes typiques de ces milieux.

### **D. Correctifs possibles**

Bien entendu, la période de croissance des plantes après leur plantation est critique. Il faut donc maintenir le système à un niveau d'eau optimal selon les plantes choisies jusqu'à ce qu'elles aient atteint une bonne maturité. Brix recommande de maintenir un débit faible dans les unités de traitement pour faciliter la croissance des plantes.

Le maintien d'un niveau d'eau au-dessus de la surface au printemps permet d'éviter la croissance de graminées (Cooper, 1990).

### **3.7.4 Odeurs**

#### **A. Description**

Les systèmes à écoulement en surface sont plus susceptibles de créer des problèmes d'odeur que ceux à écoulement sous la surface. Normalement, les personnes ressources rencontrées et la littérature ne citent que très peu de problèmes d'odeur. Lorsque les unités à écoulement vertical sont alimentées avec des eaux septiques, il est possible que des odeurs septiques soient constatées (Liénard, communication personnelle).

#### **B. Causes possibles**

Normalement, les problèmes d'odeur sont liés à des conditions d'exploitation anaérobies. Il est possible que ces odeurs proviennent de l'effluent de la fosse septique qui arrive dans des conditions anaérobies ou qu'elles proviennent du lit planté lui-même si des conditions anaérobies y sont maintenues pendant de trop longues périodes. Enfin, un couvert végétal non uniforme trop léger peut favoriser la dissipation d'odeur plus facilement qu'un système dont le couvert végétal est dense.

#### **C. Correctifs possibles**

Toutes les solutions déjà traitées pour améliorer la quantité d'oxygène dans les eaux usées sont applicables. Liénard recommande de maintenir un temps de résidence hydraulique d'environ 12 heures dans la fosse septique en amont des lits de roseaux (*Phragmites australis*).

### **3.7.5 Insectes**

#### **A. Problèmes**

Un marais naturel est associé à la prolifération d'une multitude d'insectes. Le marais est en effet un milieu très favorable pour la croissance des oeufs et des larves ainsi que comme abri et

territoire d'alimentation des insectes. Il est donc normal d'observer la prolifération d'insectes près de ces milieux.

### **B. Impact**

L'impact de la prolifération d'insectes peut être très variable et dépend principalement de la proximité du système de traitement aux habitations. Dans un milieu déjà boisé où la densité d'insectes est assez importante, l'impact de l'ajout d'un marais peut être négligeable. Par contre, si celui-ci est implanté dans un secteur agricole ou résidentiel, la prolifération de moustiques peut être gênante pour les usagers, principalement en milieu résidentiel.

### **C. Causes possibles**

Comme nous l'avons expliqué précédemment, le marais naturel est un milieu très favorable à la prolifération d'insectes. Les systèmes à écoulement en surface libre sont beaucoup plus propices à la prolifération d'insectes que ceux dont l'écoulement est dans le sol.

### **D. Correctifs possibles**

Les problèmes d'insectes ont été relevés dans la littérature seulement dans le cas des systèmes à écoulement en surface. En effet, les systèmes à écoulement sous la surface sont beaucoup moins propices à la prolifération d'insectes. Ces derniers ne causent habituellement pas de problème. Un assèchement temporaire du milieu à surface libre dans les périodes de développement des larves peut permettre de contrôler efficacement la prolifération d'insectes (U.S.E.P.A., 1988). L'usage d'insecticides n'est pas intéressant car il nécessite un usage abondant et fréquent de produits, peut affecter le rendement du système en détruisant une partie de la flore bactérienne et contamine l'eau traitée.

Dans l'ensemble, des problèmes de moustiques n'ont pas été relevés dans les systèmes à écoulements verticaux ou horizontaux sous la surface.

### **3.7.6 Risques de propagation des plantes utilisées**

Une recherche visant à évaluer les risques associés à l'utilisation du roseau (*Phragmites australis*) au Québec pour le traitement des eaux usées a été réalisée pour le compte du ministère de l'Environnement du Québec et de la Société québécoise d'assainissement des eaux (Villeneuve et al, 1992). Celle-ci a permis de démontrer que le roseau (*Phragmites australis*) est présent dans la majeure partie des territoires habités du Québec et principalement dans la plaine du Saint-Laurent. Cette plante tend à coloniser principalement les milieux humides à semi-humides perturbés. Elle peut former des

colonies par reproduction asexuée par prolifération de ses rhizomes ou peut se répandre par reproduction sexuée. Au Québec, et principalement dans les zones extérieures à la plaine du Saint-Laurent, les conditions de température sont peu propices à la prolifération du roseau (*Phragmites australis*) par les graines. L'usage de cette plante pour le traitement des eaux usées des municipalités ou industries isolées peut être envisagé si les précautions suivantes sont prises:

- plantation de deux rangées de végétation autour des systèmes. Celles-ci pourraient consister en des aulnes (*Alnus sp.*) à l'intérieur et des conifères à l'extérieur;
- entretien autour des systèmes pour éviter le développement des stolons à l'extérieur de celui-ci.

Il n'est pas recommandé d'utiliser le roseau (*Phragmites australis*) dans des systèmes d'épuration des eaux usées au stade des connaissances actuelles dans des régions isolées du Québec où l'espèce n'est pas présente (Villeneuve et al, 1992) telles qu'aux Îles-de-la-Madeleine.

# REFERENCES

**BAVOR, H. J., D. J. ROSER, P. J. FISHER ET I. C. SMALLS, 1990**

*Performance of Solid-Matrix Wetland Systems, Viewed as Fixed-Film Bioreactors*

Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 646-656 pages

**BOUTIN, C., 1987**

*Domestic wastewater treatment in tanks planted with rooted macrophytes: case study; description of the system; design criteria and efficiency*

Article de revue, Water Science and Technology, vol. 19, no. 10, 29-40 pages

**BRIX, H., 1992**

*Specialist group on the use of macrophytes in water pollution control*

Brix, Hans, Department of plant ecology, University of Aarhus, 36 pages

**BRIX, H., 1991 b**

*Wastewater treatment in constructed wetlands: An overview of system design, removal processes and treatment performance*

Wetlands Laboratory and the University of West Florida Institute for coastal and estuarine research, Constructed wetlands for water quality improvement, 92-92 pages

**BRIX, H., 1991 a**

*Macrophyte mediated oxygen transfer in constructed wetlands: Transport mechanisms and rates*

Wetlands Laboratory and the University of West Florida Institute for coastal and estuarine research, Constructed wetlands for water quality improvement, 25-25 pages

**BRIX, H., 1987 b**

*Treatment of wastewater in the rhizosphere of wetland plants*

Article de revue, Water Science and technology, vol. 19, no. 1/2, 107- 118 pages

**BRIX, H., 1987 a**

*The applicability of the wastewater treatment plant in othresen as scientific documentation of the root-zone method*

IAWPRC, Water science and technology, Vol.19, No.10, pp. 19-24 pages

**BRIX, H. ET H.-H. SCHIERUP, 1990 b**

*Soil oxygenation in constructed reed bed: the role of macrophyte and soil-atmosphere interface oxygen transport*

Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 53-66 pages

**BRIX, H. ET H.-H. SCHIERUP, 1990 a**

*Danish Experience with Sewage Treatment in Constructed Wetlands*

Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 565-573 pages

**BRIX, H. ET H.-H. SCHIERUP, 1986**

*Root zone systems - opérationnal experience of danish systems in the initial phase*

Rapport pour le comité de protection environnementale, 80 pages

**BURKA, U. ET P. C. LAWRENCE, 1990**

*A new community approach to waste treatment with higher water plants*

Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 359-372 pages

**CEMAGREF, 1990**

*Les filtres plantés de roseaux*

13 pages

**CEMAGREF, 1989**

*Traitement des eaux résiduaires - Liste des publications*

**CEMAGREF, 1985**

*Les lits à macrophytes; État actuel des connaissances*  
15 pages

**COOPER, P. F., 1990 a**

*European design and operations guidelines for reed bed treatment systems*  
Papiers préparés pour conférence tenue à Cambridge en Angleterre, 25 pages

**COOPER, P. F. ET ALL, 1989**

*Sewage treatment by reed bed systems, the present situation in the U.K.*  
Water Research Center Stevenage, United Kingdom, Journal of the Institution of water and Environmental Management

**COOPER, P. F. ET ALL., 1990 b**

*The use of reed bed treatment systems in the U.K.*  
Article de revue Wat. Sci. tech., vol. 22, no. 3/4, 57-64 pages

**COOPER, P. F. ET FINDLATER, 1990 d**

*Constructed wetlands in water pollution control*  
Compte rendus de conférences tenues à Cambridge, U.K., 602 pages

**COOPER, P. F. ET J. A. HOBSON, 1990 c**

*Sewage Treatment by Reed Bed Systems: The Present Situation in the United Kingdom*  
Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 153-172 pages

**DAVIES, T. H., J. T. WATSON ET D. B. JENKINS, 1990 c**

*Treatability assessment of industrial wastes by a portable wetland unit*  
Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 403-410 pages

**DESJARDINS, RAYMOND, 1989**

*Traitement des eaux usées de la municipalité de St-Jean Baptiste Vianney par un étang d'infiltration habité par de la flore de marais*  
Centre Écologique du Lac Saint-Jean Inc., 3 pages

**ESSER, DIRK, 1992**

*Proposition pour le traitement des eaux usées - BTOPARK "ROTIERRAST" OBERGAILBACH (57)*  
Société d'ingénierie nature et technique, 8 pages

**ESSER, DIRK, 1989**

*Contribution à la compréhension des mécanismes d'élimination des phosphates pour des systèmes d'épuration rustiques à cultures fixées (lits à macrophytes, lits d'infiltration-percolation)*  
81 pages

**FINDLATER, B. C., J. A. HOBSON ET P. F. COOPER, 1990**

*Reed bed treatment systems: performance evaluation*  
Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 193-204 pages

**FONDATION UNIVERSITAIRE LUXEMBOURGEOISE, 1991**

*Épuration des eaux par mosaïque hiérarchisée d'écosystèmes artificiels - Station expérimentale de Viville*  
F.U.L., 170 pages

**FROSTMAN, THEODORE M., 1992**

*Evaluation of wetland quality using a numerical functional value matrix*  
STS Consultants, Ltd, 10 pages

**FROSTMAN, THEODORE M., 1991**

*System-Wide approach acidie mine drainage abatement*  
Wetlands Laboratory and the University of West Florida Institute for coastal and estuarine research, Constructed wetlands for water quality improvement, 1-1 pages

**GEARHEART, R. A., F. KLOPP ET G. ALLEN, 1990***Constructed Free Surface Wetlands to Treat and Receive Wastewater: Pilot Project to Full Scale*

Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 121-138 pages

**GELLER, GUNTHER, 1990 b***Recueil d'articles***GELLER, GUNTHER, A. LENZ ET K. KLEYN, 1991***"Planted soil filters" for wastewater treatment: The complex system "Planted soil filter", its components, their development and interdependence*

Wetlands Laboratory and the University of West Florida Institute for coastal and estuarine research, Constructed wetlands for water quality improvement, 63-64 pages

**GELLER, GUNTHER, K. KLEYN ET A. LENZ, 1990 a***"Planted soil filters" for wastewater treatment: the complex system "planted soil filter", its components and their development*

Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 161-170 pages

**GERSBERG, R. M., R. A. GEARHEART ET M. IVES, 1990 a***Pathogen Removal in Constructed Wetlands*

Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 431-446 pages

**GERSBERG, R. M., S. R. LYON, R. BRENNER ET B. V. ELKINS, 1990 b***Integrated Wastewater Treatment Using Artificial Wetlands: A Gravel Marsh Case Study*

Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 145-152 pages

**GIRTS, M. A. ET R. L. KNIGHT, 1990***Operations Optimization*

Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 417-430 pages

**GREEN, BEN ET J. UPTON, 1991***Reed bed treatment for small communities: experience in the U.K.*

Wetlands Laboratory and the University of West Florida Institute for coastal and estuarine research, Constructed wetlands for water quality improvement, 67-67 pages

**GROSS, M.A. AND J. HESTIR, 1991***A comparison of local waste materials for Sulfate-Reducing wetlands substrate*

Wetlands Laboratory and the University of West Florida Institute for coastal and estuarine research, Constructed wetlands for water quality improvement, 3-3 pages

**GROSSE, W., 1990***Thermosmotic Air Transport in Aquatic Plants Affecting Growth Activities and Oxygen*

Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 469-476 pages

**HABERL, R. ET R. PERFLER, 1990 b***Seven years of research work and experience with wastewater treatment by a reed bed system*

Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 205-214 pages

**HABERL, R. ET R. PERFLER, 1990 a***Root-Zone System: Mannersdorf—New Results*

Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 606-621 pages

**HANCOCK, JEAN. J. ET LAKSHIME R. BUDD HAVARAPU, -***Advanced wastewater treatment with lemna technology*

Lemna Corporation, Compte rendu de conférence "Constructed wetlands for water quality improvement- An international symposium-Pensacola Floride.", pp.21 pages

**HEDIN, R. S., R. HAMMACK ET D. HYMAN, 1990***Potential Importance of Sulfate Reduction Processes in Wetlands Constructed to Treat Mine Drainage*

Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 508-514 pages

**HEDIN, R.S., R.W. NAIRN ET H.M. EDENBORN, 1991***Contaminant removal by wetlands constructed to treat polluted coal mine drainage*

Wetlands Laboratory and the University of West Florida Institute for coastal and estuarine research, Constructed wetlands for water quality improvement, 2-2 pages

**HERSKOWITZ, JOAN, 1986***Listowell artificial marsh project report*

Research Advisory Committee Ontario Ministry of Environment

**HOBSON, J. A., 1990***Hydraulic Considerations and the Design of Reed Bed Treatment Systems*

Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 628-635 pages

**KICKUTH, REINHOLD, 1990***L'épuration des eaux usées par la rhizosphère (par culture de roseaux)*

Phragmittech Inc., 25 pages

**KICKUTH, REINHOLD, 1989***Installation for purifying liquids using a through-flow: Controlled aquatic plant-containing filter bed*

Brevet déposé États-Unis

**KICKUTH, REINHOLD, 1984***Das Wurzelraumverfahren in der Paris (the application of the Root Zone process)*

Sanderdruckaus Landschaft + Stadt, pp. 144-153 pages

**KICKUTH, REINHOLD, 1982***17eth-d for building up defined phosphate deposits from waste phosphates*

Brevet Américain #4,331,533, 8 pages

**KICKUTH, REINHOLD, 1979***Conversion and degradation of organic and inorganic nitrogen compounds from heavily loaded wastewaters in amphibic soils*

Modelling Nitrogen from wastes, pp. 35-43 pages

**KNIGHT, R. L. ET M. E. IVERSON, 1990***Design of the Fort Deposit, Alabama, constructed wetlands treatment system*

Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 521-524 pages

**LEMNA CORPORATION, 1991***Lemna Natural Wastewater Treatment Systems*

43 pages

**LIENARD, ALAIN, 1991***Traitement des eaux usées domestiques par lits d'infiltration-Percolation sur sable-Étude expérimentale du site de Saint-Symphorien de Lay - Suivis et rapport définitif*

105 pages

**LIENARD, ALAIN ET ALL., 1990 c***Recueil d'articles*

- LIENARD, ALAIN, C. BOUTIN ET D. ESSER, 1990 a**  
*Domestic wastewater treatment with emergent hydrophyte beds in France*  
 Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 183-192 pages
- LIENARD, ALAIN, D. ESSER, A. DEGUIN ET ALL., 1990 b**  
*Sludge dewatering and drying in reed beds: an interesting solution? General investigation and first trials in France*  
 Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 257-268 pages
- METTETAL, J. P. ET ALL., 1991**  
*Épuration par infiltration sur sable; Suivi et évaluation*
- METTETAL, J. P. ET ALL., 1990**  
*Suivi et évaluation du dispositif d'épuration par lits à macrophytes de Pannessières*  
 15 pages
- MILLER, -**  
*Internal flow systems*  
 British Hydromechanic, Research Association, Cranfield, Bedford, MK430AJ
- MILLER, G., 1990**  
*Use of Artificial Cattail Marshes to Treat Sewage in Northern Ontario, Canada*  
 Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 636-642 pages
- MOSHIRI, DR. GÉRALD A. ET CHARLOS C. MILLER, 1991**  
*An integrated solid waste facility design involving recycling, volume reduction, and wetlands leachate treatment*  
 Constructed wetlands for the water quality improvement an international symposium, 15 pages
- NATIONAL SMALL FLOWS CLEARINGHOUSE, 1990 b**  
*Constructed wetlands growing throughout U.S.*  
 5 pages
- NATIONAL SMALL FLOWS CLEARINGHOUSE, 1990 a**  
*Cooperative effort leads to innovative treatment system for North Carolina subdivision*  
 4 pages
- OOSTROM, A. J. VAN ET R. N. COOPER, 1990**  
*Meat processing effluent treatment in surface-flow and gravel-bed constructed wastewater wetlands*  
 Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 321-332 pages
- PAULY, U., 1990**  
*Performance data of a wastewater and sludge treatment plant derived from the root zone method set against the background of detention times*  
 Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 289-300 pages
- PUJOLD, R. ET ALAIN LIENARD, 1990**  
*Qualitative and quantitative characterization of waste water for small communities*  
 Article de revue "Wat. Sci. Tech.", vol. 22, no. 3/4, 253-260 pages
- RADOUX, MICHEL, 1991 b**  
*La pollution et l'épuration des eaux dans le monde.*  
 Fondation Universitaire Luxembourgeoise, Recueil- Epuration des eaux par mosaïque hiérarchisée d'écosystèmes artificiels, 8 pages
- RADOUX, MICHEL, 1991 a**  
*Rôle de la fréquence des prélèvements de la biomasse produite sur les capacités épuratrices de Lemna minor L.*  
 Fondation Universitaire Luxembourgeoise; Recueil - Epuration des eaux par mosaïque hiérarchisée d'écosystèmes artificiels, p.12 pages

**RADOUX, MICHEL, 1989***Epuration des eaux par hydrosère*

Fondation Universitaire Luxembourgeoise, Recueil- Epuration des eaux par mosaïque hiérarchisée d'écosystèmes artificiels, pp.62-68 pages

**RADOUX, MICHEL, 1986 c***Epuration des eaux usées domestiques par hydrosères reconstituées sous climat tempéré. Hypothèses d'application sous climat sahélien.*

Fondation Universitaire Luxembourgeoise, Recueil- Epuration des eaux par mosaïque hiérarchisée d'écosystèmes artificiels, pp. 11-20 pages

**RADOUX, MICHEL, 1986 b***Etude expérimentale de l'épuration de rejets domestiques par des marais artificiels.*

Fondation Universitaire Luxembourgeoise, Recueil- Epuration des eaux par mosaïque hiérarchisée d'écosystèmes artificiels , pp. 94-100 pages

**RADOUX, MICHEL, 1986 a***Etude expérimentale de l'épuration de rejets domestiques par des marais artificiels.*

Fondation Universitaire Luxembourgeoise, Recueil- Epuration des eaux par mosaïque hiérarchisée d'écosystèmes artificiels, pp. 83-90 pages

**RADOUX, MICHEL, 1982***Etude comparée des capacités épuratrices d'un lagunage et d'un marais artificiel miniature recevant la même eau usée en zone rurale*

Fondation Universitaire Luxembourgeoise, Recueil- Epuration des eaux par mosaïque hiérarchisée d'écosystèmes artificiels , pp. 346-352 pages

**RADOUX, MICHEL, 1980***Approche écologique et expérimentale des potentialités épuratrices du roseau commun: Phragmites australis*

Fondation Universitaire Luxembourgeoise, Recueil- Epuration des eaux par mosaïque hiérarchisée d'écosystèmes artificiels, pp. 329-339 pages

**RADOUX, MICHEL, 1977***Contribution à l'étude de la productivité de la structure et du fonctionnement de roselières des districts Mosan et Lorrain*

225 pages

**RADOUX, MICHEL, 1977***Contribution à l'étude de la productivité, de la structure et du fonctionnement de roselières des districts Mosan et Lorrain*

Documentation photographique, 29 pages

**RADOUX, MICHEL, 1977***Contribution à l'étude de la productivité, de la structure et du fonctionnement de roselières des districts Mosan et Lorrain*

Volume II, 230 pages

**RADOUX, MICHEL, 1977***Contribution à l'étude de la productivité, de la structure et du fonctionnement de roselières des districts Mosan et Lorrain*

Annexes, 121 pages

**RADOUX, MICHEL ET D. KEMP, 1991 d***Le rôle des "macrophytes" dans l'épuration des eaux usées par hydrosère reconstituée: le cas d'un héliophyte Typha latifolia L..*

Fondation Universitaire Luxembourgeoise, Recueil- Epuration des eaux par mosaïque hiérarchisée d'écosystèmes artificiels , p.18 pages

**RADOUX, MICHEL ET D. KEMP, 1990 b**

*The impact of ageing on the purification efficiency of a plantation of *Thipha latifolia* L.*

Fondation Universitaire Luxembourgeoise, Recueil - Epuration des eaux par mosaïque hiérarchisée d'écosystèmes artificiels, pp. 149-159 pages

**RADOUX, MICHEL ET D. KEMP, 1990 a**

*The impact of ageing on the purification efficiency of a plantation of *Typha latifolia* L.*

Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 149-160 pages

**RADOUX, MICHEL ET D. KEMP, 1988**

*Etude comparée des eaux usées domestiques par trois plantations héliophytiques et par un lagunage à microphytes sous un même climat tempéré.*

Fondation Universitaire Luxembourgeoise, Recueil - Epuration des eaux par mosaïque hiérarchisée d'écosystèmes artificiels, pp. 25-38 pages

**RADOUX, MICHEL ET M. NEMCOVA, 1991 e**

*Epuration des eaux usées par écosystèmes reconstitués: La station expérimentale de Viville. Bilan et perspectives.*

Fondation Universitaire Luxembourgeoise, Recueil - Epuration des eaux par mosaïque hiérarchisée d'écosystèmes artificiels, p.12 pages

**RADOUX, MICHEL, D. KEMP, B. DEBROUX ET C. DELVAUX, 1991 c**

*Réhabilitation d'une friche industrielle. L'aménagement intégré du terri de Germignies avec les eaux usées urbaines de Lallaing*

Fondation Universitaire Luxembourgeoise, Recueil - Epuration des eaux par mosaïque hiérarchisée d'écosystèmes artificiels, pp. 27-31 pages

**REID, G. K., 1984**

*La vie de l'étang (Guide des plantes et animaux communs aux lacs et étangs de l'Amérique du Nord)*

Édition Marcel Broquet, 159 pages

**SCHIERUP, HANS-HENVIK ET H. BRIX, 1990 a**

*Danish Experience with emergent hydrophyte treatment systems (EHTS) and prospects in the light of future requirements on outlet water quality*

IAWPRC, Water Science and Technology vol. 22 n. 3/4 pp. 65-72, pp. 65 pages

**SCHIERUP, HANS-HENVIK, H. BRIX ET B. LORENZEN, 1990 c**

*Spilderands forskning fra miljøstyrelsen - investigation concerning the state of the art of Danish constructed reed beds*

Rapport gouvernemental danois, numéro 8, 87 pages

**SCHIERUP, HANS-HENVIK, H. BRIX ET B. LORENZEN, 1990 b**

*Wastewater treatment in constructed reed beds in Denmark - state of the art*

Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 495-504 pages

**SCHIERUP, HANS-HENVIK, H. BRIX ET B. LORENZEN, -**

*Wastewater Treatment in Constructed Reed Beds in Denmark - State of the art*

pp. 495-504 pages

**SCHWARTZ, A. L. ET R. L. KNIGHT, 1990**

*Some Ancillary Benefits of a Natural Land Treatment System*

Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 643-645 pages

**SEIDEL, KATHE, 1973**

*System for purification of polluted water*

Brevet américain #3,770,623, 8 pages

**SEIDEL, KATHE ET ALL., 1978***Contributions to revitalisation of waters*

Publication du Stiftung Limon logische Arbeitsgruppe, Meerbusch, 62 pages

**STEINER, GERALD R., JAMES T. WATSON ET KIMBERLY D. CHOATE, 1991***General design, construction and operation guidelines: constructed wetlands wastewater treatment systems for small users including individual residences*

23 pages

**SUNDBLAD, KARIN ET HANS-B WITGREN, 1989***Glyceria maxima for wastewater nutrient removal and forage production*

Article de revue "Biological wastes", numéro 27, 29-42 pages

**SUNDBLAD, KARIN ET HANS-B. WITGREN, 1991***Wastewater nutrient removal and recovery in an infiltration wetland*

Éds. C. Etnier &amp; B. Guterstam, Compte rendu de conférences: Ecological Engineering for wastewater treatment, pp. 190-198 pages

**TCHOBANOGLIOUS, GEORGE, 1991***Land-based systems, constructed wetlands, and aquatic plant systems in the United States: An overview*

Éds. C. Etnier &amp; B. Guterstam, Compte rendu de conférences: Ecological Engineering for wastewater treatment, pp. 110-120 pages

**TENNESSEN, K., 1991***Production and suppression of pest mosquitoes in constructed wetlands*

Wetlands Laboratory and the University of West Florida Institute for coastal and estuarine research, Constructed wetlands for water quality improvement, 55-55 pages

**U.S.E.P.A., 1991***Managing small flows*

National Small Flows Clearinghouse, volume 5, numéro 3

**U.S.E.P.A., 1989***Managing small flows, national small flows clearinghouse***U.S.E.P.A., 1988***Technology, Transfer*

EPA/600/M88/019, dépliant

**U.S.E.P.A., 1988***Design manual, constructed wetlands and aquatic plant systems for municipal wastewater treatment*

United States Environmental Protection Agency, 83 pages

**U.S.E.P.A., 1987***Report on the use of wetlands for municipal wastewater treatment and disposal*

EPA 430/09-88-005

**U.S.E.P.A., 1985***Freshwater wetlands for wastewater management*

Environmental Assessment Handbook

**U.S.E.P.A., 1978***A comparison of oxidation ditch plants to competing processes for secondary and advanced treatment on municipal wastes*

Environmental Protection Technology series #EPA-600/2-78-051

**U.S.E.P.A., 1974***Wastewater filtration - Design considerations*

EPA Technology Transfer Seminar Publication, Numéro EPA-625/4-74-0079, 48 pages

- VILLENEUVE, R. ET AL, 1992 c**  
*Contribution à la compréhension de l'écologie des phragmites (roseaux) au Québec - V.1.3 - Volume 3*  
 Consultants RSA
- VILLENEUVE, R. ET AL, 1992 b**  
*Contribution à la compréhension de l'écologie des phragmites (roseaux) au Québec - V.1.3 - Volume 2*  
 Consultants RSA
- VILLENEUVE, R. ET AL, 1992 a**  
*Contribution à la compréhension de l'écologie des phragmites (roseaux) au Québec - V.1.3 - Volume 1*  
 Consultants RSA, 59 pages
- VILLENEUVE, R. ET AL, 1991**  
*Compte-rendu d'une mission scientifique en Europe tenue du 8 au 23 septembre 1991*  
 Consultants RSA, 43 pages
- VILLENEUVE, R. ET AL, 1990**  
*Projet de démonstration et d'optimisation des procédés de traitement d'eaux usées par filtration et marais pour usage au Québec*  
 Consultants RSA, Offre de services #W0042
- VILLENEUVE, R. ET AL, 1990**  
*L'analyse de l'état des connaissances et l'évaluation de la pertinence de la construction d'ouvrages de traitement d'eaux usées à partir de la filtration biologique intermittente et/ou de la flore aquatique et semi-aquatique pour les petites agglomérations du Québec*  
 Consultants RSA, Offre de services
- VILLENEUVE, R. ET AL, 1990**  
*Complément au rapport d'étape II de l'étude préliminaire, Municipalité de Saint-Vianney*  
 Consultants RSA, SQAE - Programme d'assainissement des eaux du Québec
- VILLENEUVE, R. ET AL, 1989 c**  
*Rapport d'études préliminaires/étape III, municipalité de Saint-Vianney*  
 Consultants RSA, SQAE - Étape #3, Programme d'assainissement des eaux du Québec
- VILLENEUVE, R. ET AL, 1989 b**  
*Filtre à sable ensemencé; Municipalité de Saint-Vianney-Addenda à l'étude préliminaire / étape #2*  
 Consultants RSA, Programme d'assainissement des eaux du Québec
- VILLENEUVE, R. ET AL, 1989 a**  
*Rapport d'étude préliminaire-Étape II, Municipalité de Saint-Vianney*  
 Consultants RSA, SQAE - Programme d'assainissement des eaux du Québec
- W.P.C.F., 1990**  
*Natural systems for wastewater treatment*  
 Manuel de pratique #FD-16, 255 pages
- WATSON, JAMES T. ET ANDREW J. DANZIG, 1991**  
*Pilot Scale Nitrification Studies Using Vertical Flow and Shallow Horizontal Flow Constructed Wetland Cells*  
 Tennessee Valley Authority - Water Quality Department, pp. 16 pages
- WATSON, JAMES T. ET J. A. HOBSON, 1990 a**  
*Hydraulic Design Considerations and Control Structures for Constructed Wetlands for Wastewater Treatment*  
 Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 379-392 pages
- WATSON, JAMES T., K. D. CHOATE ET G. R. STEINER, 1990 c**  
*Performance of constructed wetland treatment systems at Benton, Hardin, and Pembroke, Kentucky, during the early vegetation establishment phase*  
 Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 171-182 pages

**WATSON, JAMES T., S. C. REED, R. H. KADLEC ET ALL., 1990 b***Performance Expectations and Loading Rates for Constructed Wetlands*

Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 319-352 pages

**WIEDER, R. K., G. TCHOBANOGLIOUS ET R. W. TUTTLE, 1990***Preliminary Considerations Regarding Constructed Wetlands for Wastewater Treatment*

Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 297-306 pages

**WINTER, MARGARITA ET REINHOLD KICKUTH, 1989***Elimination of sulphur compounds from wastewater by the root zone process-1. Performance of a large-scale purification plant at a textile Finishing Industry*

Water Resources Vol.23 No.5, pp. 535-546 pages

**WINTER, MARGARITA ET REINHOLD KICKUTH, 1985***Elimination of nutrients (sulphur, phosphores, nitrogen) by the foot zone process and sinol tanexus degradation of organic matter*

the utrecht Plant Ecology News Report 4, pp.123-140 pages

**WINTER, MARGARITA ET REINHOLD KICKUTH, b***Elimination of sulphur compounds from wastewater by the foot zone process.**- II Mode of formation of sulphur deposits.*

Water Resource. Vol.23 No.5, pp.547-560 pages

**WINTER, MARGARITÁ ET REINHOLD KICKUTH, a***Sulphur compounds-Their enviromental aspect and their eliminats from wastewater.*

Toxicological and Environemental Chemistry, pp. 507-514 pages

**WITTGREN, H. B., 1988***Removal of wastewater nitrogen in a wetland filter*

Linköping University, Recueil d'articles, 75 pages

**WITTGREN, H. B. ET KAREN SUNDBLAD, 1990 a***Removal of wastewater nitrogen in an infiltration wetland with *Glyceria maxima**

Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 85-96 pages

**WITTGREN, H. B. ET KARIN SUNDBLAND, 1990 b***Removal of waste water nitrogen in an infiltration wetland with *glyceria maxima**

Article de conférence , 12 pages

## 4. POTENTIEL DES DIFFÉRENTS TYPES DE PROCÉDÉ POUR APPLICATION AU QUÉBEC

### 4.1 Mise en situation

Jusqu'à maintenant, la majeure partie des systèmes à écoulement en surface ont été construits aux États-Unis, tandis que ceux à écoulement sous la surface sont présents principalement en Europe. Les caractéristiques des eaux usées et les conditions d'exploitation de ces pays sont différentes de celles du Québec. Le tableau 4.1 montre les caractéristiques généralement rencontrées pour les eaux usées domestiques et résidentielles aux États-Unis. En Europe, il est généralement reconnu d'utiliser comme débit moyen de conception 200 l/pers./d et une charge massique de 40 g/pers.·d en DBO<sub>5</sub>. Le tableau 4.2 compare les principales caractéristiques des eaux usées domestiques en Europe et au Québec. Les débits d'infiltration sont très importants au Québec et représentent en général de 50 à 150% des débits d'eaux usées domestiques. Les valeurs généralement reconnues au Québec sont de 320 l/pers.·d de débits d'eaux usées de 54 g/pers.·d de DBO<sub>5</sub> et de 60 g/pers.·d de matières en suspension. En général, les affluents des systèmes de traitement québécois reçoivent des débits par personne beaucoup plus importants qu'en Europe et des concentrations en DBO<sub>5</sub> et matières en suspension beaucoup plus faibles. Les systèmes pouvant opérer à de bonnes charges hydrauliques et à faibles charges massiques seront donc avantagés. Il est aussi important de rappeler les pointes de débit importantes observées au Québec lors de la fonte des neiges qui sont de beaucoup moindre envergure dans les régions européennes.

Un second aspect très important pour la sélection et la conception des systèmes est l'hiver québécois dont les moyennes de température de janvier sont en général d'environ 10 à 15°C inférieures aux températures européennes.

### 4.2 Identification des procédés à meilleurs potentiels

L'orientation suggérée ci-après, quant aux choix et procédés les plus prometteurs pour le Québec, est basée sur l'état des connaissances actuelles et ne présume en rien d'une bonne ou mauvaise performance des procédés non retenus. En effet, certains procédés peuvent avoir été écartés dû au manque d'informations ou d'applications semblables aux conditions du Québec ou compte tenu de certains problèmes rencontrés dans des installations existantes. Il est donc possible que certaines modifications ou procédés puissent bien fonctionner au Québec.

Sur la base entre autres des expériences réalisées à Listowell et Cobalt en Ontario, les marais à écoulement en surface opèrent difficilement dans les conditions très froides. Considérant leur faible profondeur d'eau, la couche de glace en surface devient très importante et diminue de beaucoup le temps de résidence hydraulique durant la période hivernale. Pour éviter un gel complet du système, il est normalement nécessaire de rehausser le niveau d'eau à l'automne. Ces types de système causent des problèmes de prolifération de moustiques aux États-Unis qui sont difficilement contrôlables.

TABLEAU 4.1

**LES CARACTÉRISTIQUES MOYENNES DES EAUX USÉES  
DOMESTIQUES RÉSIDENIELLES  
AUX ÉTATS-UNIS**

Fraction	Concentration	
	Typique	Étendue
DBO <sub>5</sub> (mg/l)	392	216 - 540
MES (mg/l)	436	240 - 600
NH <sub>3</sub> - N (mg/l)	14	4 - 20
N <sub>org</sub> - N (mg/l)	43	24 - 60
TKN (mg/l)	57	31 - 80
P <sub>org</sub> - P (mg/l)	7	4 - 10
P <sub>inorg</sub> - P (mg/l)	12	6 - 17
Graisse (mg/l)	70	45 - 100
Colis totaux (n/100 ml)	10 <sup>8</sup>	10 <sup>7</sup> - 10 <sup>10</sup>
Température (°C)	20	14 - 25
pH	7,2	5 - 8

Source: Tchobanoglous et Burton 1991, Metcalf and Eddy, 3<sup>e</sup> édition 1991.

TABLEAU 4.2

**COMPARAISON DES CARACTÉRISTIQUES DES EAUX USÉES DOMESTIQUES  
EN EUROPE ET AU QUÉBEC**

PROVENANCE	DÉBIT MOYEN (1) (l/pers. d)	DBO5		MES	
		g/pers. d	mg/l	g/pers. d	mg/l
EUROPE	200	40	200	40	200
QUÉBEC — Réseau neuf	250	40 à 54 (5)	—	—	—
— Réseau étanche (2)	480	40 à 54 (5)	112,5	60	125
— Réseau moyen (3)	640	40 à 54 (5)	84,4	60	94
— Réseau peu étanche (4)	800	40 à 54 (5)	56,2	60	75

- (1) Débit moyen combiné d'eaux usées et d'infiltration
- (2) Infiltration de 0,5 Q eaux usées
- (3) Infiltration de 1 Q eaux usées
- (4) Infiltration de 1,5 Q eaux usées
- (5) La valeur utilisée dans le présent document est de 54 g/pers.·d

De plus, il est plus difficile dans cette sorte d'unité de maintenir des conditions aérobies et d'éviter les problèmes d'odeur, surtout si les charges organiques sont élevées. Ce procédé est en effet fréquemment utilisé en traitement tertiaire. L'objectif de la démarche actuelle vise plus spécifiquement des besoins de traitement secondaire. Les systèmes opérant avec des lenticules (*Lemna sp.*) pourraient eux aussi être envisagés pour la déphosphatation, mais les superficies nécessaires sont importantes et l'enlèvement du phosphore ne peut être envisagé que durant la période active des plantes, ce qui représente un maximum de 4 à 6 mois au Québec.

Les systèmes à écoulement horizontal sous la surface et les systèmes hybrides composés d'unités verticales et horizontales sous la surface peuvent, à notre avis, être adaptés aux conditions du Québec. Les barèmes suivants pourraient être utilisés pour le choix de la chaîne de traitement par marais. Suite aux résultats des premières installations implantées au Québec, ceux-ci pourront être ajustés. Dans un premier temps, la concentration en DBO<sub>5</sub> à l'affluent est un critère fondamental puisqu'elle gouverne la quantité d'oxygène nécessaire dans le système pour digérer la matière organique. Les unités HSS peuvent assurer une aération adéquate lorsque les concentrations en DBO<sub>5</sub> sont faibles mais les unités verticales aèrent beaucoup plus facilement et peuvent être nécessaires lorsque les concentrations sont élevées. Les grandes lignes suivantes pourraient être retenues pour la conception:

- si la DBO<sub>5</sub> en aval de la fosse septique  $\leq 100$  mg/l  $\Rightarrow$  1 unité HSS
- si  $100$  mg/l  $<$  DBO<sub>5</sub> en aval de la fosse septique  $\leq 150$  mg/l  $\Rightarrow$  1 unité verticale et 1 unité HSS
- si la DBO<sub>5</sub> en aval de la fosse septique  $> 150$  mg/l  $\Rightarrow$  2 unités verticales et 1 unité HSS

Les systèmes composés de 2 unités verticales peuvent s'avérer nécessaires lorsque des charges industrielles importantes sont présentes. Des systèmes ayant seulement des rejets municipaux ont besoin tout au plus d'un seul palier vertical en amont d'une unité à écoulement horizontal.

Le meilleur moyen d'assurer un bon enlèvement de l'azote avec les marais est de maintenir des phases d'aération et non aérées pour favoriser la nitrification et la dénitrification. Lorsque l'enlèvement de l'azote est demandé, il est préférable d'avoir un système avec au moins 1 unité verticale suivie de 1 unité HSS. Au Québec, jusqu'à maintenant, le ministère de l'Environnement du Québec n'a établi aucune exigence de rejet en azote pour la majorité des systèmes de traitement municipaux.

L'enlèvement du phosphore peut être envisagé avec ce type de procédé mais les résultats actuels sont très variables et les facteurs permettant d'assurer un bon enlèvement à long terme du phosphore sont mal compris et difficilement contrôlables. Si ce type de procédé est envisagé pour l'enlèvement du phosphore, il doit compter au moins 1 unité verticale suivie de 1 unité

horizontale sous la surface. Le média filtrant sélectionné devra comprendre des ions ferreux ou d'aluminium pour favoriser l'adsorption du phosphore dans le sol. Si l'argile est retenue pour fournir les ions d'aluminium nécessaires, elle doit être intégrée en quantité limitée (5 à 10% maximum) pour éviter qu'elle ne diminue trop la capacité hydraulique du système.

La plante recommandée est le roseau commun (*Phragmites australis*) car les conditions d'exploitation des systèmes (niveau d'eau près de la surface et séquence d'inondation et séchage) sont caractéristiques du milieu naturel pour la croissance du roseau (*Phragmites australis*). Cette plante est la plus généralement utilisée et son comportement dans ce type de procédé est bien connu. Elle existe en abondance au Québec et il est possible d'utiliser des colonies dans les régions où les systèmes de traitement sont prévus pour les plantations.

#### 4.3 Forces et faiblesses du procédé par marais suggérées

##### 4.3.1 Avantages du procédé

Ces systèmes sont peu profonds et peuvent donc être très petits contrairement aux étangs qui deviennent difficiles à construire lorsque les volumes sont faibles. Ils peuvent même être morcelés sur le territoire si les points de rejets sont très étalés. Les coûts supplémentaires associés au morcellement du système sont très faibles pour les unités HSS mais non négligeables pour les unités hybrides qui nécessitent tout de même une plus grande quantité de regards, de contrôles et de conduites interconnectrices.

Ces systèmes dégagent très peu d'odeurs et créent peu de nuisances. Il serait à notre avis acceptable, suite à nos nombreuses visites d'installations existantes, de construire ces équipements à une distance de 75 m lorsqu'ils correspondent à une population desservie inférieure à 100 personnes et à 150 m des résidences si leur capacité est plus importante, surtout si une ceinture végétale est constituée autour du marais. Bien entendu, il faudra tenir compte, lors de la localisation des installations, de la direction des vents dominants et autres aspects esthétiques.

Ce procédé peut facilement être installé sur un terrain dont la pente est inférieure à 15%. Les frais supplémentaires occasionnés pour l'implantation de marais dans des pentes supérieures à 15% demeurent raisonnables si la disponibilité des terrains plats est contraignante.

Si le matériau en place est argileux, le coût des marais sera diminué et ceux-ci seront avantageux par rapport à un champ d'infiltration. L'exploitation des marais est simple et des équipements mécaniques se résument à des séries de vannes, quelques piézomètres et flottes de contrôle. La consommation d'énergie est négligeable et la formation nécessaire à l'exploitation est minime. Ce procédé peut être bien adapté à des municipalités en région agricole car la

croissance des plantes est bien connue des gens du milieu et il sera facile de trouver un responsable capable d'assurer l'entretien de ces dernières.

Les superficies nécessaires à la construction des marais sont inférieures aux étangs aérés à faibles débits (< 100 personnes) et semblables pour des débits de plus grande importance (> 400 personnes) (voir chapitre 10).

#### **4.3.2 Inconvénients du procédé**

Les marais réagissent plus mal que les étangs à de fortes variations des débits. Un débit supérieur à la capacité hydraulique des systèmes HSS occasionnera un écoulement en surface, mais il a été démontré (Brix, 1990) qu'une bonne capacité épuratoire est maintenue même dans ces conditions. Par contre, si la capacité hydraulique des unités à écoulement vertical est dépassée, une conduite de dérivation devra permettre d'éviter le débordement de ces unités pour acheminer les eaux usées aux HSS. Il y a possibilité de prolifération d'insectes surtout s'il y a écoulement en surface.

La sélection des médias filtrants est très importante et ceux-ci doivent être disponibles dans l'environnement immédiat du site de traitement. Normalement, des distances jusqu'à environ 40 km sont acceptables pour le prélèvement des matériaux constituant les média filtrants.

Tel que discuté précédemment, il est recommandé d'utiliser des plantes locales et le concepteur doit s'assurer que celles-ci sont disponibles dans le milieu environnant.

#### **4.4 Discussion**

Les démarches présentées aux chapitres 3 et 4 ont permis de faire un tour d'horizon des différents systèmes existants et de l'état des connaissances et d'en arriver à une proposition de critères de conception des ouvrages qui sont présentés au chapitre 5. Celui-ci traite d'aspects déjà discutés aux chapitres 3 et 4 en retenant ceux qui nous apparaissent les plus importants et qui définissent le mieux les phénomènes en présence.

## REFERENCES

**BRIX, H. ET H.-H. SCHIERUP, 1990 b**

*Soil oxygenation in constructed reed bed: the role of macrophyte and soil-atmosphere interface oxygen transport*  
Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 53-66 pages

**BRIX, H. ET H.-H. SCHIERUP, 1990 a**

*Danish Experience with Sewage Treatment in Constructed Wetlands*

Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 565-573 pages

**METCALF ET EDDY INC., 1979**

*Wastewater engineering: treatment, disposal, reuse*

2e édition, McGraw Hill, 920 pages

**TCHOBANOGLIOUS, GEORGE, 1991**

*Land-based systems, constructed wetlands, and aquatic plant systems in the United States: An overview*

Éds. C. Etnier & B. Guterstam, Compte rendu de conférences: Ecological Engineering for wastewater treatment, pp. 110-120 pages

## **5. CRITÈRES DE CONCEPTION**

### **5.1 Description générale du système de traitement**

Tel que discuté précédemment, la chaîne de traitement par marais peut varier selon les concentrations en  $DBO_5$  à l'entrée et les objectifs de rejet. Les figures 5.2 à 5.4 montrent un schéma général de chacune des chaînes de traitement possibles.

Le marais artificiel de type 1 comprend un seul étage de traitement composé d'unités HSS. L'affluent est acheminé à une fosse septique puis le débit est réparti uniformément entre un minimum de deux unités HSS qui sont contrôlées par une chambre de contrôle de niveau automatique. La construction d'un minimum de deux unités HSS est recommandée afin qu'il soit possible de réaliser des travaux d'entretien ou de réparation dans une unité, tout en permettant un certain niveau de traitement dans l'autre durant cette période. L'alimentation des unités HSS s'effectue à débit continu.

Le schéma général des marais artificiels de type 2 comprend un premier étage à écoulement vertical et un second étage de type HSS. Une fosse septique est prévue en tête de traitement, mais certains auteurs (Liénard) considèrent qu'elle n'est pas essentielle. Par la suite, une chambre de répartition est nécessaire afin d'alimenter les unités verticales par vagues successives. L'étage vertical est composé de quatre unités en parallèle qui sont alimentées sur une période variant de 1 à 2 jour(s) chacune et mises au repos de 3 à 6 jours, tel qu'illustré à la figure 5.1. Les vannes électromagnétiques à l'entrée des unités permettent de contrôler l'alimentation intermittente.

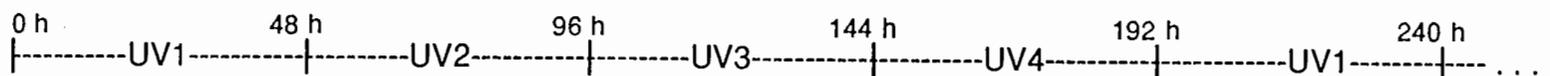
La séquence d'alimentation typique d'un étage vertical composé de quatre unités est montrée à la figure 5.1. Des vannes électromagnétiques sont installées à l'entrée de chacune des unités verticales et contrôlent l'alimentation intermittente. L'unité verticale 1 est alimentée de 0 à 48 heures, par la suite c'est l'unité verticale 2 et ainsi de suite. Durant la période d'alimentation de l'unité verticale 1 qui dure 2 jours, le débit n'est pas continu. Il est amené à l'unité par vagues successives comme on peut le voir sur cette même figure. L'alimentation dure environ 15 minutes puis est arrêtée pour une période de 45 minutes. Cette séquence est répétée durant 48 heures et reprise par la suite pour l'unité verticale 2. Les séquences d'alimentation par vagues successives sont contrôlées par un répartiteur. Lorsque celui-ci est plein, il commande le démarrage d'une pompe ou l'ouverture d'une vanne pour se vider. Le volume du répartiteur doit être établi pour permettre des alimentations d'environ 15 minutes et des arrêts d'environ 45 minutes. Bien sûr, durant les périodes de forts débits, les séquences d'alimentation et de fermeture seront plus fréquentes.

Des chambres de contrôle de niveau manuel, à la sortie des unités, sont nécessaires afin de pouvoir gérer la croissance des plantes par des séquences d'inondation et d'assèchement, si nécessaire. Par la suite, le second étage de type HSS est semblable à celui présenté à la figure 5.3.

FIGURE 5.1

SÉQUENCE D'ALIMENTATION D'UN ÉTAGE VERTICAL COMPOSÉ DE 4 UNITÉS

Alimentation intermittente



Alimentation par vagues successives de l'unité  
verticale no. 1 (se répète par la suite pour les autres unités)

A = Alimentation  
F = Fermée

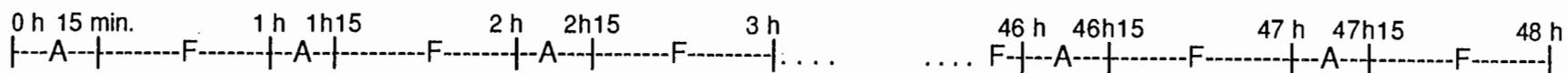
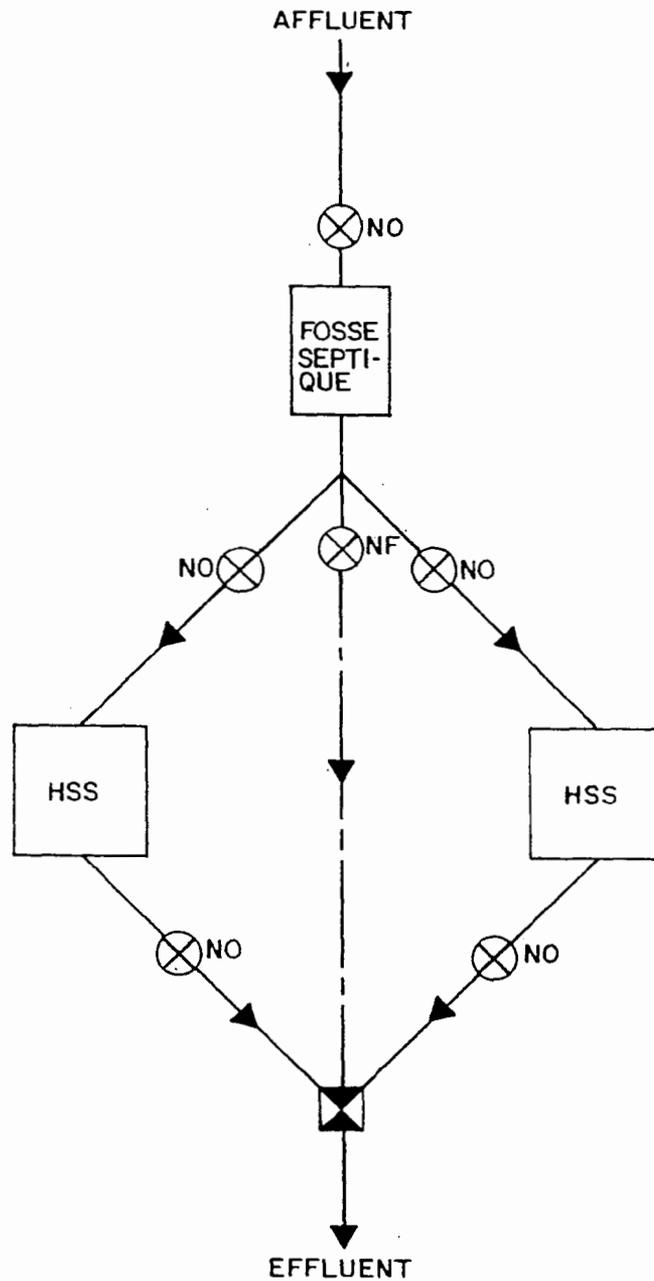


FIGURE 5.2

**SCHEMA GÉNÉRAL D'UN SYSTÈME  
MARAIS ARTIFICIEL TYPE 1 (HSS)**



-  Vanne manuelle
-  Chambre de contrôle de niveau manuel
-  Chambre contrôle de niveau automatique
-  Vanne électromagnétique

- V1 Vanne #1
- NO Normalement ouverte
- NF Normalement fermée
- Conduites principales
- - - Conduites de dérivation
- - - Trop-pleins

FIGURE 5.3

**SCHÉMA GÉNÉRAL D'UN SYSTÈME  
MARAIS ARTIFICIEL TYPE 2  
(VERTICAL + HSS)**

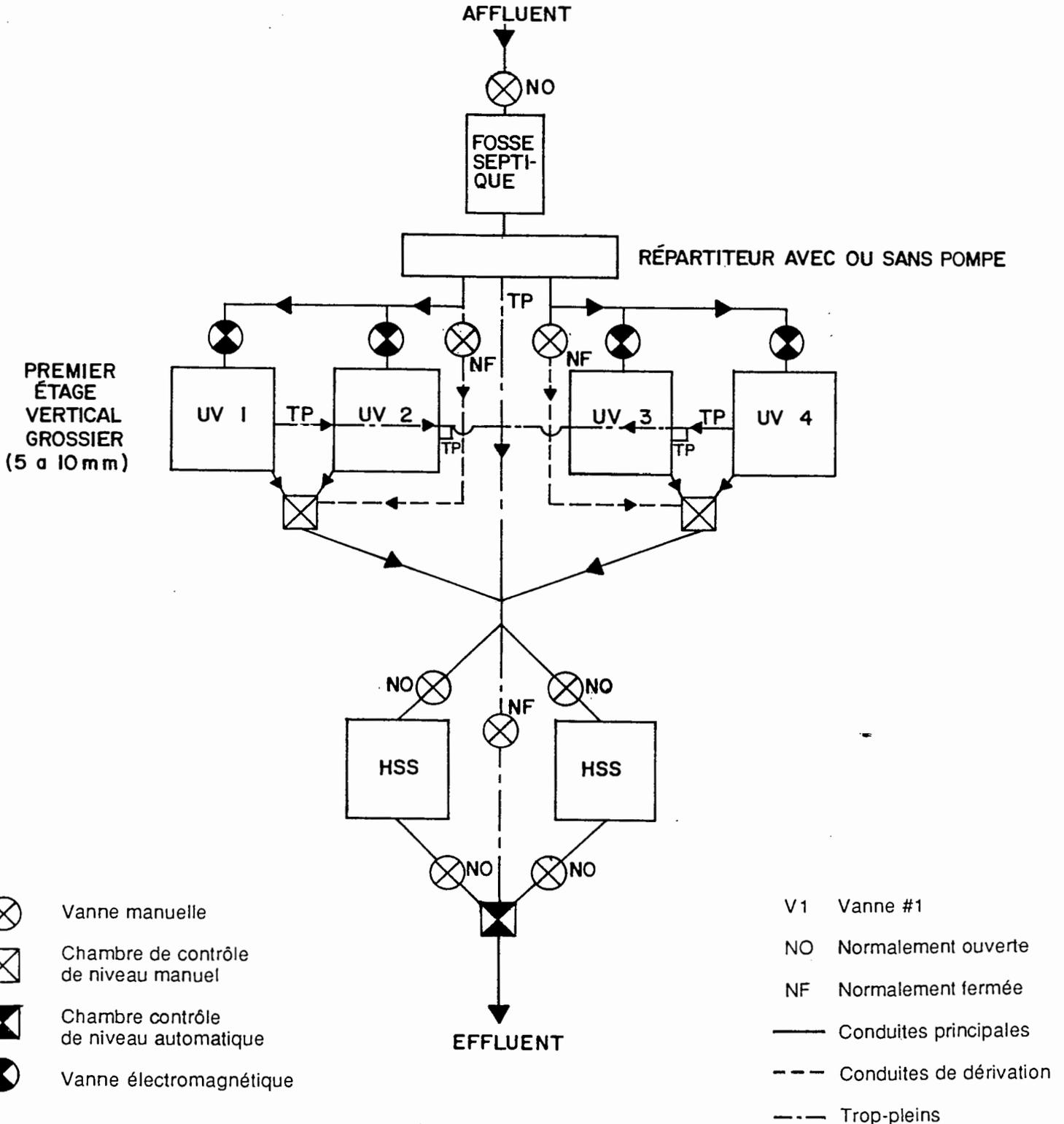
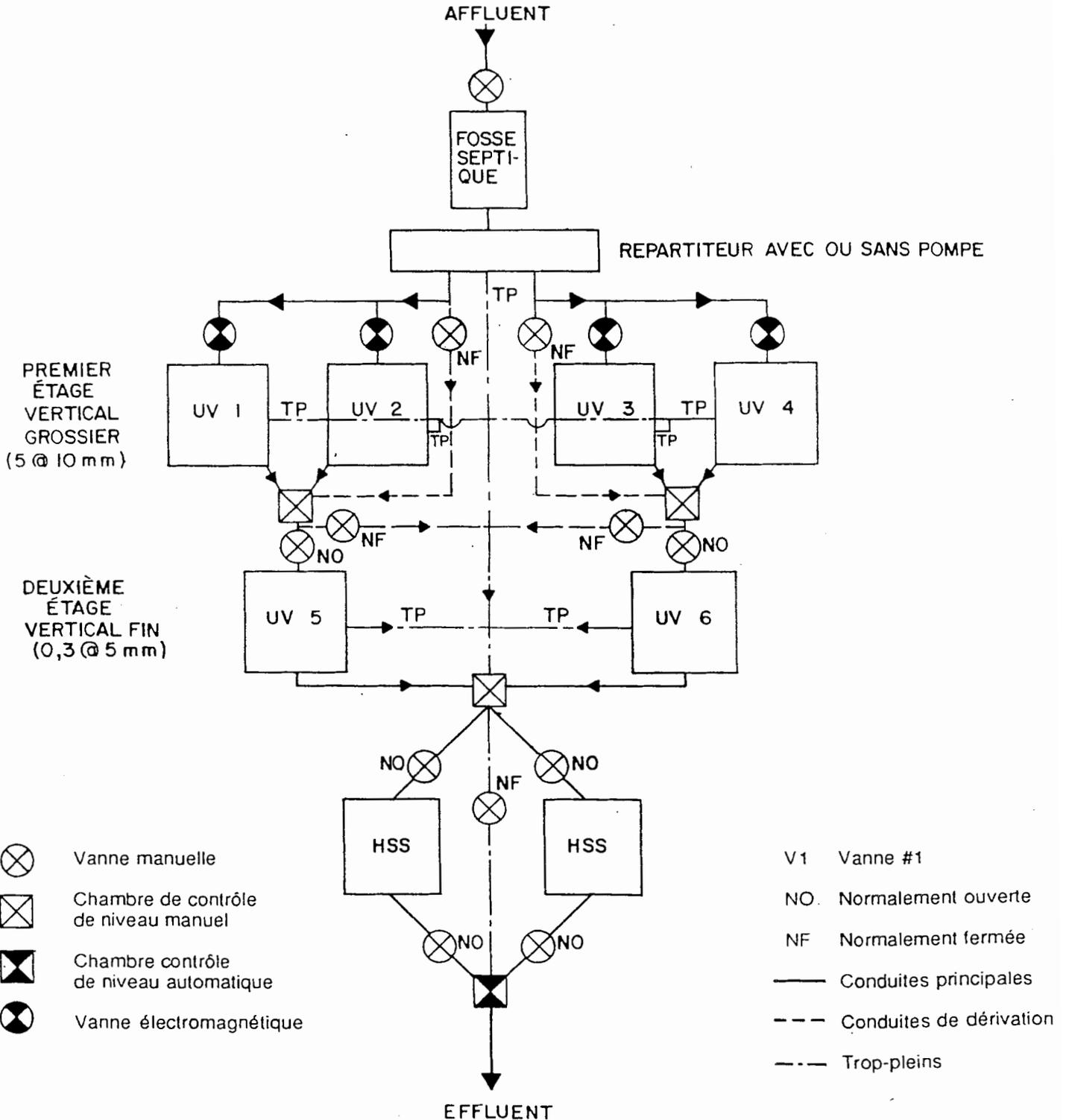


FIGURE 5.4

**SCHÉMA GÉNÉRAL D'UN SYSTÈME  
DE TRAITEMENT DE TYPE 3  
(VERTICAL + VERTICAL + HSS)**



Le système de type 3 comprend un étage vertical intermédiaire ajouté entre le premier étage vertical et le dernier étage à écoulement horizontal sous la surface. Ce second étage à écoulement vertical est composé de 2 unités qui sont alimentées en intermittence en aval de la première série d'unités verticales, le tout tel que montré à la figure 5.4.

Les critères de conception des étages composés d'unités à écoulement vertical et de ceux composés d'unités à écoulement horizontal sous la surface sont présentés ci-après. Le détail des ouvrages de contrôle des travaux d'aménagement et ouvrages connexes est présenté au chapitre 7. Le dimensionnement des unités est normalement effectué sur la base des débits moyens journaliers.

Les conditions d'exploitation nécessaires à la conception de ce type de système sont les mêmes que celles recommandées pour des systèmes de traitement des eaux usées par étangs aérés et doivent être établies conformément aux critères du ministère de l'Environnement du Québec.

## **5.2 Conception d'un étage composé d'unités verticales**

### **5.2.1 Généralités**

Les étages composés d'unités verticales doivent en tout temps être suivis par un étage horizontal à écoulement sous la surface. Ce dernier permet de maintenir un temps de résidence hydraulique et de finaliser la filtration et l'enlèvement de la DBO.

Le prétraitement sera constitué d'une fosse septique avec temps de rétention de 24 heures. Compte tenu de l'état actuel des connaissances, nous suggérons que soit évaluée, lors du suivi des premières installations, la possibilité de diminuer le volume de la fosse septique. Considérant la présence de la fosse septique, le dégrillage ne s'avère pas nécessaire. Les marais verticaux doivent être alimentés par vagues successives afin d'assurer une couverture complète de la surface de l'unité à toutes les fois. Pour ce faire, il est nécessaire de précéder le premier étage vertical par un répartiteur. Celui-ci peut être équipé de pompes à faible pression ou tout simplement fonctionner par gravité si la topographie le permet. Le système de distribution est traité à la section 7.12.

Le premier étage vertical comprend toujours quatre unités qui sont alimentées en alternance. Si un second étage vertical est nécessaire, celui-ci peut comprendre seulement deux unités alimentées en alternance. Les périodes de repos du premier étage doivent être plus longues pour assurer un bon assèchement de la surface qui comprend la majeure partie des particules grossières. Une description détaillée des bases théoriques pour la conception des unités à écoulement vertical est présentée à l'annexe V.

### 5.2.2 Rôle des étages à unités verticales

L'avantage principal des étages à unités verticales est relié à leur capacité de fournir une aération des eaux usées en maintenant des conditions d'écoulement non saturées dans le gravier filtrant. Il permet donc une bonne stabilisation du carbone organique lorsque les concentrations sont élevées et peut assurer une nitrification lorsque l'enlèvement de l'azote est envisagé. Ces unités assurent un bon enlèvement des matières en suspension. La déphosphatation par adsorption est envisageable si des ions ferreux et d'aluminium sont disponibles dans l'eau, mais des études additionnelles sont nécessaires avant d'entreprendre des travaux d'envergure. L'incorporation d'argile dans le média filtrant n'est pas recommandée car il ne serait pas possible d'y maintenir un milieu non saturé.

### 5.2.3 Principales composantes d'une unité verticale

La figure 5.5 montre une coupe type schématique d'une unité à écoulement vertical. On y retrouve, en premier lieu, une membrane imperméabilisante qui est nécessaire si le sol en place est trop perméable. Les parois de l'unité doivent être conçues le plus vertical possible afin d'assurer un écoulement uniforme dans l'ensemble du lit. Les parois en pente vont occasionner des conditions à débits plus importants sur le pourtour des unités.

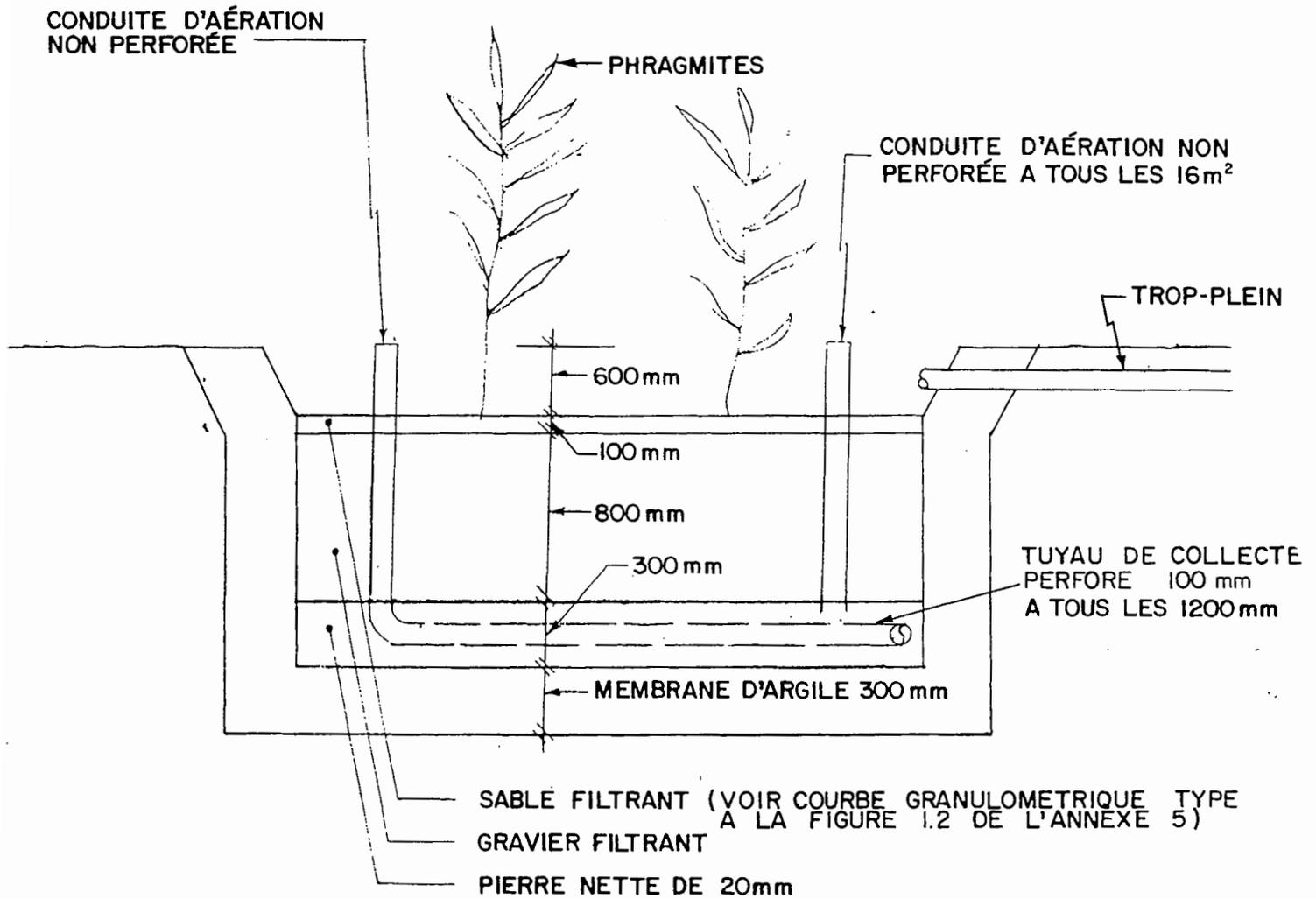
Le fond de l'unité est composé d'une couche de pierre nette de 300 mm d'épaisseur pour assurer un bon drainage des eaux usées vers des conduites perforées espacées de 1 200 mm sous le lit.

Une ou plusieurs couches de gravier filtrant recouvre(nt) cette surface sur une épaisseur de 800 mm. Le choix du matériau doit tenir compte des caractéristiques des eaux usées et de la disponibilité du matériau dans les environs. On doit vérifier les critères de filtre entre les matériaux pour éviter la contamination du matériau plus grossier par celui adjacent plus fin. L'utilisation d'une membrane géotextile pour remplacer une couche de gravier intermédiaire est déconseillée car les risques de colmatage sont trop importants.

La surface est composée d'un sable filtrant uniforme de 100 mm d'épaisseur. Celui-ci permet d'assurer un recouvrement de l'ensemble de la surface du lit lors des alimentations. Les roseaux (*Phragmites australis*) couvrent l'ensemble de la surface du filtre. Le filtre doit avoir une revanche de 600 mm et un trop-plein doit être installé pour assurer une vidange s'il y a plus de 400 mm d'eau en surface du lit.

Des conduites d'aération verticales non perforées sont installées à tous les 16 m<sup>2</sup> et favorisent l'apport d'oxygène dans le média.

FIGURE 5.5

COUPE TYPE D'UNE UNITÉ VERTICALE

#### 5.2.4 Dimensionnement d'une unité verticale

Les débits et charges journaliers d'été et d'hiver sont utilisés pour le dimensionnement de ces équipements. Si à cause de conditions particulières ou la présence d'industries certaines périodes ont des charges très différentes, ces conditions doivent aussi être vérifiées pour le dimensionnement des unités verticales. Plusieurs facteurs influencent l'exploitation et le rendement des étages à écoulements verticaux. Notons entre autres:

- le nombre d'unités par étage;
- la longueur des périodes d'alimentation et de séchage;
- la séquence des vagues successives;
- les concentrations principalement en MES et DBO à l'entrée;
- le taux d'application massique;
- la granulométrie du sable et du gravier filtrants;
- la température de l'eau.

Ces aspects sont traités de façon plus détaillée à l'annexe V. Les critères de dimensionnement précisés ci-après sont représentatifs des rendements obtenus dans différentes stations opérant actuellement et correspondent à ceux généralement obtenus avec les matériaux recommandés.

Chaque unité de traitement doit avoir la capacité suffisante pour passer le débit durant la période d'alimentation de cette unité. La charge hydraulique retenue est inférieure à la capacité hydraulique du sable filtrant lorsque la tête d'eau sur sa surface est presque nulle et permet d'obtenir une saturation d'environ 50% du gravier filtrant. Les méthodes permettant d'établir un système dans différentes conditions sont complexes et sont traitées plus en détail à l'annexe V.

Chaque unité doit être alimentée à un taux d'application hydraulique maximal de 0,8 m/d (800 l/m<sup>2</sup>·d) durant la période d'alimentation. Les vagues d'alimentation d'une durée d'environ 15 minutes seront nécessairement beaucoup plus importantes que cela. Si l'étage compte quatre unités de même dimension, la superficie totale de l'étage sera donc établie sur la base de 0,2 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·d tandis qu'elle sera de 0,4 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·d pour un étage de deux unités.

Le débit de chaque vague successive sera supérieur à 0,8 m/d mais sur de courtes périodes. On observera alors une légère accumulation d'eau en surface du lit et un assèchement.

Ces unités peuvent traiter des pointes journalières du double de celles retenues pour la conception. Dans les contextes normaux où le débordement est accepté à des fréquences d'une fois par mois, les unités verticales pourront en général être conçues sur la base du débit moyen à nappe haute. Par contre, si les critères de débordement sont sévères, il est possible que l'unité doive être dimensionnée à partir d'un débit plus important. La sélection du débit de conception devra être établie lors des études préliminaires, suite

au dépôt des critères de rejet de la Direction de la qualité du milieu aquatique du ministère de l'Environnement du Québec.

La charge massique totale en DBO<sub>5</sub> pour l'ensemble de l'étage est de 40 g/m<sup>2</sup>·d. La superficie des unités est établie en prenant la condition la plus contraignante. La forme des unités n'a pas d'importance sur les rendements mais celle-ci devrait se rapprocher de la forme carrée afin de diminuer les longueurs de digues nécessaires.

### 5.2.5 Sélection des médias filtrants

Il est possible d'utiliser différents matériaux granulaires dans les unités verticales et le concepteur doit réaliser des recherches afin de choisir un matériau qui est disponible localement. Il est possible qu'un tamisage soit nécessaire afin d'obtenir les caractéristiques demandées mais il n'est pas recommandé de faire concasser le matériau. La pierre concassée est anguleuse et risque de perturber la croissance des plantes. Le choix du matériau dépend de la concentration des eaux usées en DBO<sub>5</sub>. Bien qu'au niveau préliminaire les perméabilités puissent être établies sur la base de valeur théorique, le matériau retenu devra faire l'objet d'analyses en laboratoire pour établir le coefficient de perméabilité en condition saturée, la porosité et la granulométrie. Bien que le système opère en condition non saturée, il n'existe pas de méthodes standardisées pour établir en laboratoire un coefficient de perméabilité non saturé. C'est pourquoi le coefficient de perméabilité en condition saturée devrait être établi et les valeurs en condition non saturée peuvent alors être déduites à partir de méthodes détaillées à l'annexe V.

Les matériaux doivent avoir les caractéristiques suivantes:

- a. Si la DBO<sub>5</sub> est plus grande que 150 mg/l
  - sable filtrant
    - K minimum =  $5 \times 10^{-3}$  cm/s
    - Cu < 4
    - D<sub>50</sub> > 0,6 mm
  - gravier filtrant
    - K minimum = 5 cm/s
    - pierre nette de 10 à 150 mm avec moins de 25% > 25 mm
  
- b. Si la DBO<sub>5</sub> est plus petite que 150 mg/l
  - sable filtrant
    - K minimum =  $1 \times 10^{-3}$  cm/s
    - Cu < 4
    - D<sub>50</sub> > 0,4 mm
  - gravier filtrant
    - K minimum =  $5 \times 10^{-1}$  cm/s
    - gravier de 5 à 25 mm avec moins de 15% de sable

Par la suite, il faut s'assurer que les couches de matériaux filtrants soient conformes à la loi des filtres. Si ce n'est pas le cas, il faudra ajouter une ou des couche(s) intermédiaire(s) pour s'y conformer.

La granulométrie des couches de média filtrant doit être choisie afin d'être conforme à la loi des filtres. Cette approche permet d'éviter une contamination du matériau sous-adjacent plus grossier par le matériau plus fin et de s'assurer que le matériau plus grossier maintienne une perméabilité plus grande que celui en surface. Les deux conditions suivantes doivent être respectées:

$$D_{15} \text{ (du matériau grossier)} \leq 5 D_{85} \text{ (du matériau fin)}$$

$$D_{15} \text{ (du matériau grossier)} \geq 5 D_{15} \text{ (du matériau fin)}$$

$$\text{et } K \text{ (matériau grossier)} \geq 100 \times K \text{ (matériau fin)}$$

**OÙ:**

$D_x$  est le diamètre de la particule à x% passant.

Le matériau plus grossier doit avoir une courbe relativement parallèle au matériau plus fin ou plus étalé.

#### **5.2.6 Dimensionnement du répartiteur**

Le répartiteur doit avoir un volume efficace égal à la superficie d'une unité multipliée par 0,1 m. Ce volume est calculé entre les flottes de départ et d'arrêt du répartiteur. Les contrôles et l'ajustement des flottes devront pouvoir permettre des vagues successives assurant la couverture d'une unité avec de 20 à 100 mm d'eaux usées. Si on considère un débit durant l'alimentation d'une unité à 0,8 m/d, on aura donc de 8 à 40 départs du répartiteur par jour. Par exemple, si le répartiteur est ajusté pour couvrir l'unité de 100 mm d'eaux usées et que l'on reçoit un débit représentant une couche de 800 mm d'eaux usées sur la surface de l'unité dans une journée, le répartiteur enverra 8 vagues durant cette période. Les pompes et les conduites de dispersion doivent être conçues afin que le volume du répartiteur puisse être évacué dans une période d'environ 15 minutes. Le débit à la sortie du répartiteur sera donc beaucoup plus élevé que la capacité d'infiltration du sable et assurera une accumulation d'eaux usées sur toute la surface et une bonne répartition.

#### **5.2.7 Rendements escomptés**

Les rendements prévisibles pour un étage à unités verticales sont de:

- a.  $DBO_5$ 
  - 50% d'enlèvement en été;
  - 35% d'enlèvement en hiver.

## b. MES

- 80% d'enlèvement sur le premier étage;
- si la granulométrie du média filtrant du deuxième étage est semblable à celle du premier, son rôle pour un enlèvement supplémentaire de matières en suspension sera faible.

### 5.3 Conception d'un étage composé d'unités HSS

#### 5.3.1 Généralités

L'unité HSS est alimentée par une conduite perforée installée dans une pierre nette (figure 5.6). Il est important, afin d'éviter le colmatage de cette conduite, d'enlever les particules sédimentables et les huiles, graisses et débris flottants. Une fosse septique doit donc toujours être installée pour le prétraitement. Tel que discuté précédemment, un ou deux étage(s) vertical(aux) peut(vent) précéder l'étage HSS si on recherche une meilleure oxygénation. Les unités HSS sont alimentées de façon continue et la répartition uniforme du débit est assurée parce que la conduite d'alimentation est maintenue dans des conditions noyées. Il est important que le dimensionnement de ces conduites et des orifices soit réalisé avec beaucoup d'attention pour favoriser un étalement uniforme de la charge.

Le temps de résidence hydraulique dans l'unité et les conditions d'aération du média filtrant sont contrôlés par une chambre de contrôle de niveau localisée à la sortie de l'unité et contrôlée par un piézomètre et une sonde de niveau installée près de la tranchée d'alimentation.

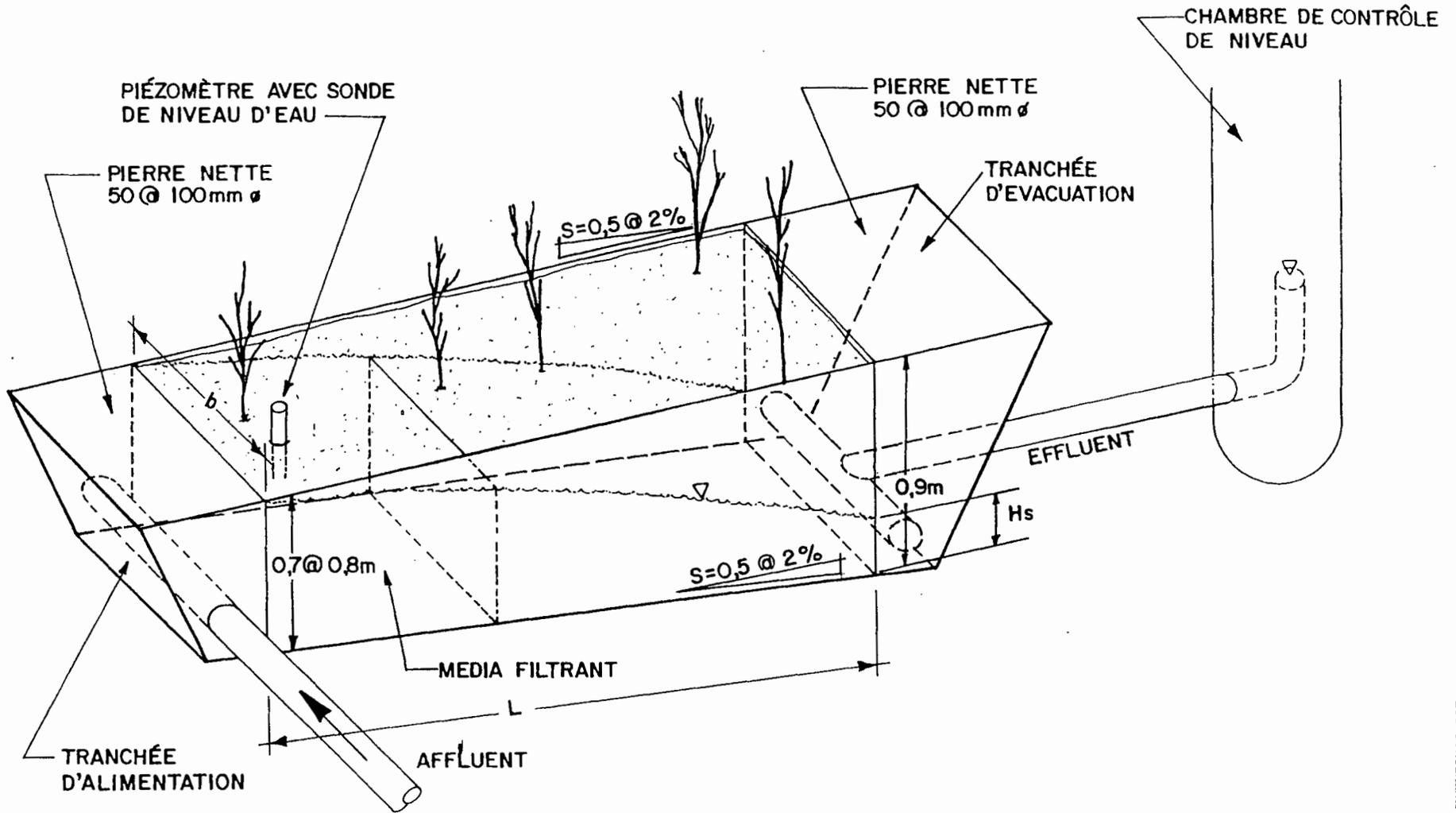
Les besoins en superficie minimaux du système sont déterminés à partir du temps de résidence hydraulique nécessaire pour obtenir les rendements escomptés. La charge hydraulique des différentes conditions permet d'établir la longueur d'écoulement maximale qui évitera une surcharge hydraulique du système en tenant compte de la perméabilité du média filtrant. La longueur du système est la distance entre la tranchée d'alimentation et la tranchée d'évacuation des unités. Le système doit être recouvert de roseaux (*Phragmites australis*) afin de maintenir sa capacité hydraulique, d'assurer un apport en oxygène et de contrôler les odeurs.

Le détail de la conception est présenté dans les pages qui suivent tandis que l'annexe V explique de façon détaillée les bases théoriques du système.

#### 5.3.2 Rôle des étages HSS

Lorsque l'étage HSS n'est pas précédé d'unités verticales, il joue le rôle d'un système de traitement secondaire. Il permet un très bon enlèvement des matières en suspension par filtration. La DBO<sub>5</sub> est enlevée par un complexe d'activités bactériologiques aérobies et anaérobies plus ou moins bien définies. Les résultats obtenus pour l'enlèvement de l'azote sont très variables et difficilement prévisibles.

FIGURE 5.6  
COUPE TYPE D'UNE UNITÉ HSS



Lorsqu'il y a présence d'ions ferreux et d'aluminium (les ions d'aluminium sont souvent rendus disponibles par une certaine proportion d'argile dans le milieu) dans le média filtrant, il est possible d'obtenir une certaine déphosphatation, mais les résultats obtenus jusqu'à maintenant sont très variables et, dans certains cas, performants à court terme.

Le potentiel d'oxydoréduction de ce type de milieu est normalement positif mais très près de 0. Lorsque les concentrations en DBO<sub>5</sub> sont relativement faibles et la capacité hydraulique du système acceptable, ce type de procédé donne de bonnes performances au niveau de l'enlèvement des matières en suspension et de la DBO<sub>5</sub>.

Lorsque les concentrations en DBO<sub>5</sub> sont plus élevées, les unités HSS réussissent plus difficilement à fournir l'oxygène nécessaire à la digestion aérobie et risquent de se colmater, compte tenu du développement de zones anaérobies importantes dans le milieu, et diminuer leur performance dû à un écoulement de surface. Il peut alors s'avérer avantageux d'ajouter, en amont de l'étage HSS, des étages à unités verticales qui permettront d'enlever les particules plus grossières, d'assurer une bonne aération pour faciliter la digestion aérobie et la réduction de la DBO et permettre une nitrification de l'azote. L'unité HSS permettra alors une filtration plus fine des matières en suspension, assurera un enlèvement complémentaire de la DBO et permettra une dénitrification, compte tenu des conditions réductrices présentes dans ce milieu.

### 5.3.3 Description des principales composantes d'une unité HSS

La figure 5.6 présente une coupe type schématique d'une unité HSS. L'écoulement de l'eau usée se fait dans le sol à partir de la tranchée d'alimentation jusqu'à la tranchée d'évacuation. Ces tranchées sont formées de pierre nette avec des conduites perforées. Le niveau d'eau dans le champ de roseaux (*Phragmites australis*) peut être contrôlé par une chambre de contrôle de niveau qui permettra de maintenir le niveau à la sortie à une hauteur prédéterminée (H<sub>s</sub>). La profondeur de l'unité à l'affluent peut varier de 0,6 à 0,7 m et à l'effluent de 0,6 à 0,9 m.

La variation de cette épaisseur peut avoir un impact important sur la capacité hydraulique du système. De plus, la zone non influencée par les racines des plantes risque de se maintenir en conditions anaérobies et de colmater. L'étude des connaissances actuelles ne permet pas d'établir avec précision la profondeur optimale de telles installations.

Le fond peut avoir une pente de 0,5 à 2% dans le sens de l'écoulement avec une différence d'élévation maximale entre l'entrée et la sortie de 100 mm. La surface aura une pente inverse au sens de l'écoulement de 0,5 à 2% avec une différence d'élévation entre l'entrée et la sortie d'un maximum de 100 mm. Cette dernière permet

de faciliter la gestion du lit et de mieux contrôler les risques de courts-circuits et d'écoulement de surface.

#### 5.3.4 Conception d'une unité HSS

La superficie de l'unité HSS dépend des rendements recherchés et du temps de résidence hydraulique nécessaire. La forme et principalement la longueur d'écoulement sont surtout contrôlées par la charge hydraulique et la perméabilité du média filtrant. Nous proposons ci-après une procédure permettant d'optimiser le dimensionnement des unités HSS.

##### **Prémises:**

Les équations développées à partir de l'intégration de la loi de Darcy sont utilisées pour établir la capacité hydraulique et la loi du premier ordre est appliquée pour l'enlèvement de la DBO<sub>5</sub>. La perméabilité du média filtrant est considérée être homogène sur toute la surface du champ. La température de l'eau usée a été établie à 16°C en été et à 5°C en hiver.

**ETAPE 1**  
**Établissement de la superficie minimale nécessaire pour obtenir les rendements**

Cette étape consiste à évaluer, pour chacune des conditions, la superficie minimale nécessaire pour obtenir les rendements escomptés. Pour ce faire, on prévoit l'ajustement de l'équipement de contrôle de niveau à une hauteur élevée (H<sub>s</sub> = 0,8 m). En effet, plus le niveau à la sortie est élevé et meilleur est le rendement obtenu pour une même superficie. La valeur maximale retenue de H<sub>s</sub> est de 0,8 m afin de conserver une marge de manoeuvre sous la surface de 100 mm.

À partir de l'équation 5.1, on établit la superficie nécessaire pour chacune des conditions d'exploitation.

$$S = L \times b = \frac{3Q (H_e^2 - H_s^2) (\ln C_e - \ln C_s) \times 86\,400}{2 k_t \rho (H_e^3 - H_s^3)} \quad (\text{Éq. 5.1})$$

##### **OÙ:**

H<sub>s</sub> = hauteur d'eau à l'effluent en m est égale 0,8 m

Q = débit moyen journalier d'eaux usées en m<sup>3</sup>/s

C<sub>e</sub> = concentration de la DBO<sub>5</sub> à l'entrée en mg/l

C<sub>s</sub> = concentration en DBO<sub>5</sub> à la sortie en mg/l

- $K_t$  = constante de premier ordre dépend de la température en  $d^{-1}$   
 =  $k_{20} \times 1,06^{(t-20)}$  ou  $K_{20}$  = constante de premier ordre à  $20^\circ \text{C}$  qui est de 0,805
- $T$  = température de l'eau usée en degré Celsius
- $\rho$  = porosité du média filtrant (sans unité)
- $L$  = longueur du système dans le sens de l'écoulement en mètres
- $b$  = largeur du système en mètres
- $H_e$  = l'épaisseur totale du lit = de 0,7 m à 0,9 m
- $S$  = la superficie totale nécessaire de l'unité HSS en  $\text{m}^2$

On retient la superficie calculée la plus grande.

## **ÉTAPE 2** **Établissement de la longueur d'écoulement du lit**

Pour une même superficie, on peut augmenter la capacité hydraulique en réduisant la longueur d'écoulement, soit la distance entre la tranchée d'alimentation et la tranchée d'évacuation. Cette étape consiste donc à vérifier, pour chacune des conditions d'exploitation, la longueur d'écoulement minimale nécessaire pour obtenir la capacité hydraulique suffisante pour passer le débit. Par exemple, dans certains cas, si on dilue une eau usée ayant une charge massique donnée, le système doit avoir une capacité hydraulique plus grande mais les rendements recherchés sont inférieurs et le temps de résidence hydraulique peut donc diminuer. À l'opposé, si l'eau usée est plus concentrée, le rendement recherché sera plus grand mais la capacité hydraulique du système pourra être abaissée. L'équipement de contrôle de niveau peut être utilisé à cet effet. Lorsque le débit augmente, le niveau à la sortie peut être abaissé afin d'augmenter la capacité hydraulique du système tout en maintenant un rendement acceptable. Si par contre le débit diminue, l'équipement de contrôle de niveau peut être relevé pour augmenter le rendement de l'unité tout en maintenant une capacité hydraulique acceptable.

L'approche visant à établir la longueur minimale nécessaire tient compte de ces possibilités d'ajustement et la première démarche consiste à déterminer la hauteur d'ajustement à la sortie minimale qui permettra d'obtenir le rendement recherché.

**Sous-étape 2.1:**

Établissement de Hs minimal qui permet d'obtenir le rendement recherché

Pour chacune des conditions d'alimentation, on calcule, à partir de l'équation 5.1 énoncée ci-haut, la valeur de Hs nécessaire à chaque condition d'exploitation en utilisant la superficie retenue à l'étape 1.

Considérant qu'il est difficile d'isoler Hs de cette équation, on peut solutionner le problème en itérant à partir de Hs égal 0,8 jusqu'à 0 afin d'obtenir la superficie calculée égale à la superficie retenue à l'étape 1. Si S calculé est plus petit que S retenu lorsque Hs est égal à 0, cela signifie que les rendements seront meilleurs pour ce cas particulier.

**Sous-étape 2.2:**

Calcul de la longueur minimale pour chacune des conditions

Pour chacune des conditions d'exploitation et à partir du Hs correspondant à chacune de ces conditions, on établit la longueur minimale requise du système à partir de l'équation 5.2.

$$L = \sqrt{\frac{K (H_e^2 - H_s^2) S}{200 Q}} \quad (\text{Éq. 5.2})$$

K = coefficient de perméabilité en cm/s

Une longueur inférieure à 3 m n'est pas recommandable afin d'éviter les écoulements préférentiels et les risques de courts-circuits. Si la longueur minimale calculée est supérieure à 3 m, on retient cette valeur et on calcule la largeur totale du système avec S et L retenus.

Par contre, si la longueur calculée minimale est inférieure à 3 m, on retient L = 3 m et on doit reprendre les calculs pour établir la superficie nécessaire qui permet de rencontrer toutes les conditions.

**ETAPE 3**

**Révision de la superficie nécessaire si on établit la longueur d'écoulement à 3 m**

S'il y a des matériaux plus grossiers disponibles, il est préférable de reprendre les calculs avec un matériau plus grossier afin d'obtenir un système de superficie minimale. Par contre, si cela n'est pas possible, le système devra être plus grand afin de permettre le passage des eaux usées sous la surface du lit. Pour ce faire, on doit suivre les étapes suivantes:

**Sous-étape 3.1:**

**Calcul du Hs minimal nécessaire pour obtenir les rendements recherchés**

Pour une valeur de L = à 3 m, on établit la hauteur de Hs nécessaire pour obtenir des rendements recherchés à chacune des conditions d'exploitation à partir de l'équation 5.3.

$$L = \sqrt{\frac{3K (He^2 - Hs^2)^2 (\ln Ce - \ln Cs) \times 86\,400}{4 k_t \rho (He^3 - Hs^3)}} \quad (\text{Éq. 5.3})$$

Considérant encore là qu'il est difficile d'isoler Hs, on itère pour des valeurs de Hs de 0 à 0,9 jusqu'à l'obtention d'une longueur de 3 m. On retient la valeur de Hs nécessaire correspondant à chacune des conditions d'exploitation.

**Sous-étape 3.2:**

**Détermination de la superficie nécessaire si L = 3 m**

Pour chacune des conditions d'exploitation et des valeurs de Hs correspondantes, on établit la superficie minimale nécessaire à l'aide de l'équation 5.4.

$$S = \frac{2QL^2}{K (He^2 - Hs^2)} \quad (\text{Éq. 5.4})$$

On retient la valeur de superficie la plus grande et on calcule la largeur avec les valeurs de superficie et la longueur de 3 m retenue.

Si les résultats de la conception créent une forme très allongée, il est possible, afin d'éviter des coûts supplémentaires dus à la construction de digues et à l'ajout de conduites, d'agencer l'unité telle que présentée à la figure 5.7. Le champ d'un système peut être organisé avec une série de tranchées d'alimentation et de tranchées d'évacuation, tel que montré sur cette figure.

---

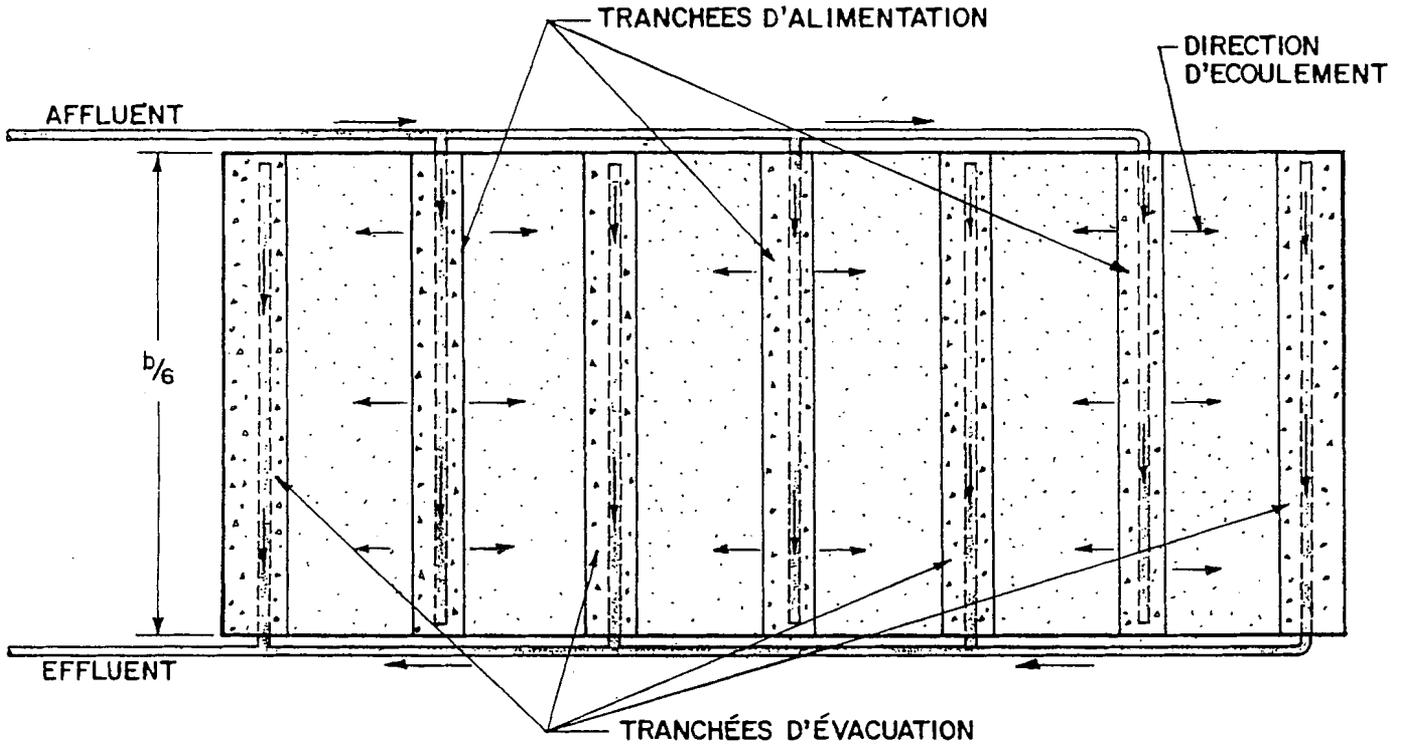
**CHEMINEMENT CRITIQUE DE LA CONCEPTION  
D'UNE UNITÉ HSS**

---

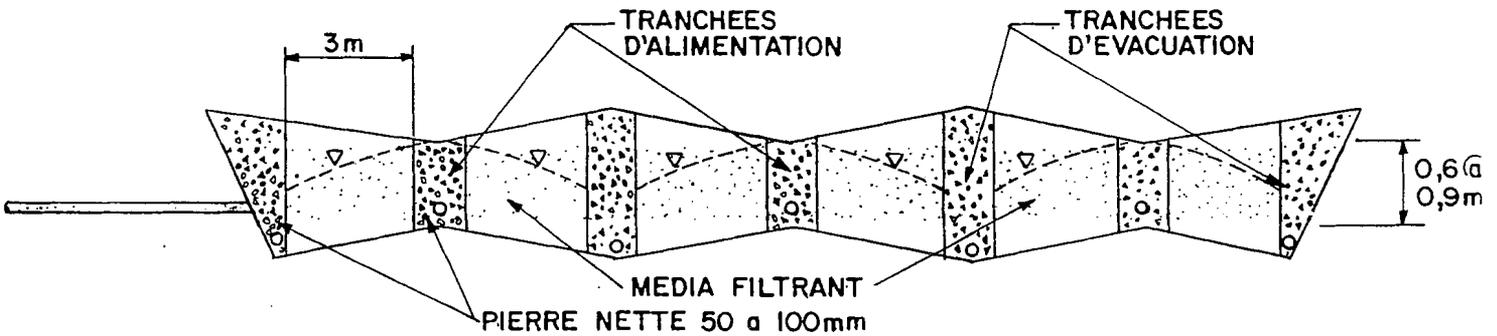
Le processus algorithmique du tableau 5.1 présente la méthode pour déterminer les dimensions d'une unité HSS. Dans le but de le rendre plus facile à suivre, les différentes activités ont été décrites et numérotées. Les symboles utilisés dans l'organigramme sont:

FIGURE 5.7

**AGENCEMENT GÉNÉRAL POSSIBLE D'UN ÉTAGE HSS**



**VUE EN PLAN**



**COUPE TRANSVERSALE**

Tableau 5.1: Organigramme décisionnel de conception d'une unité HSS

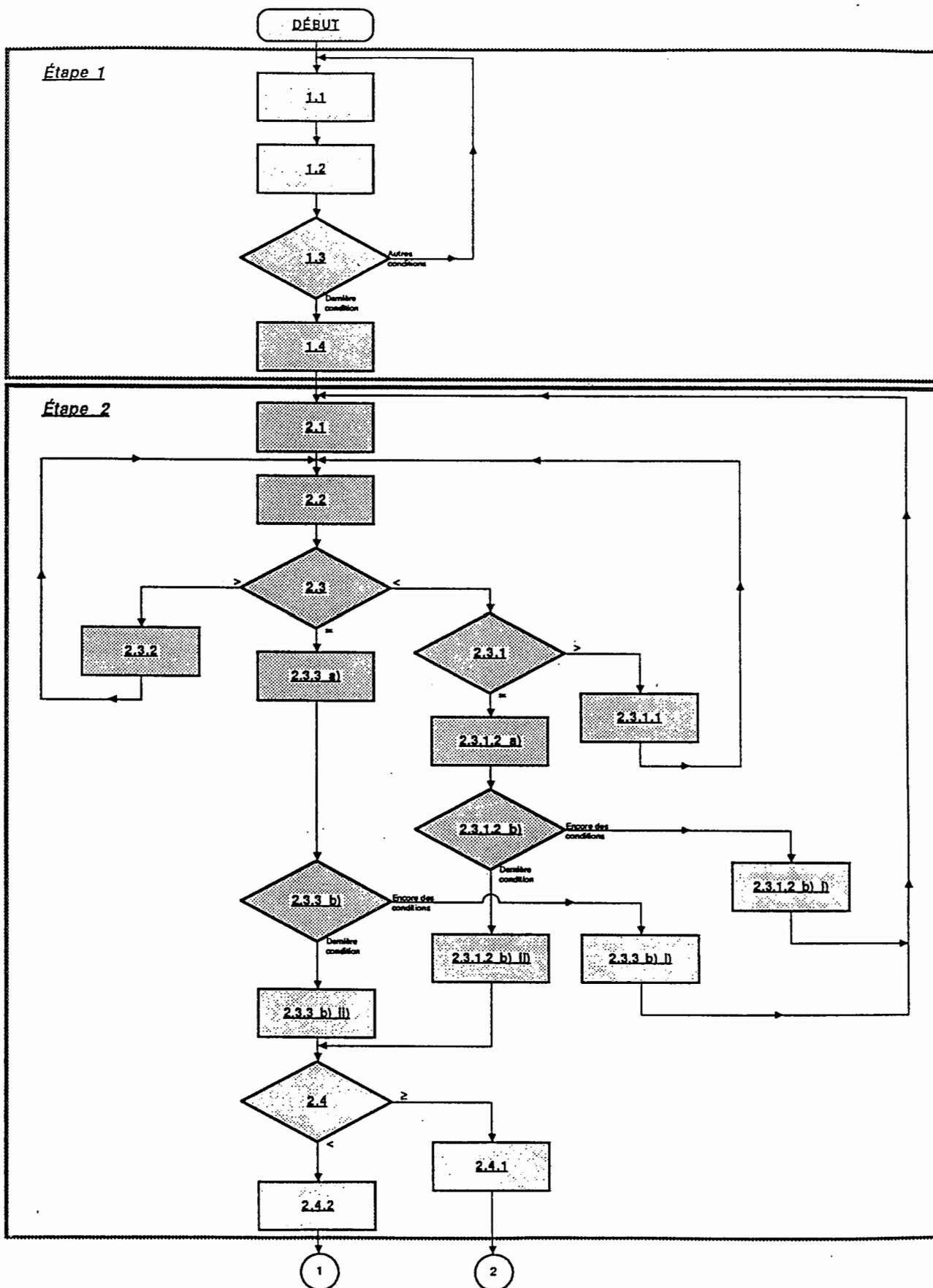
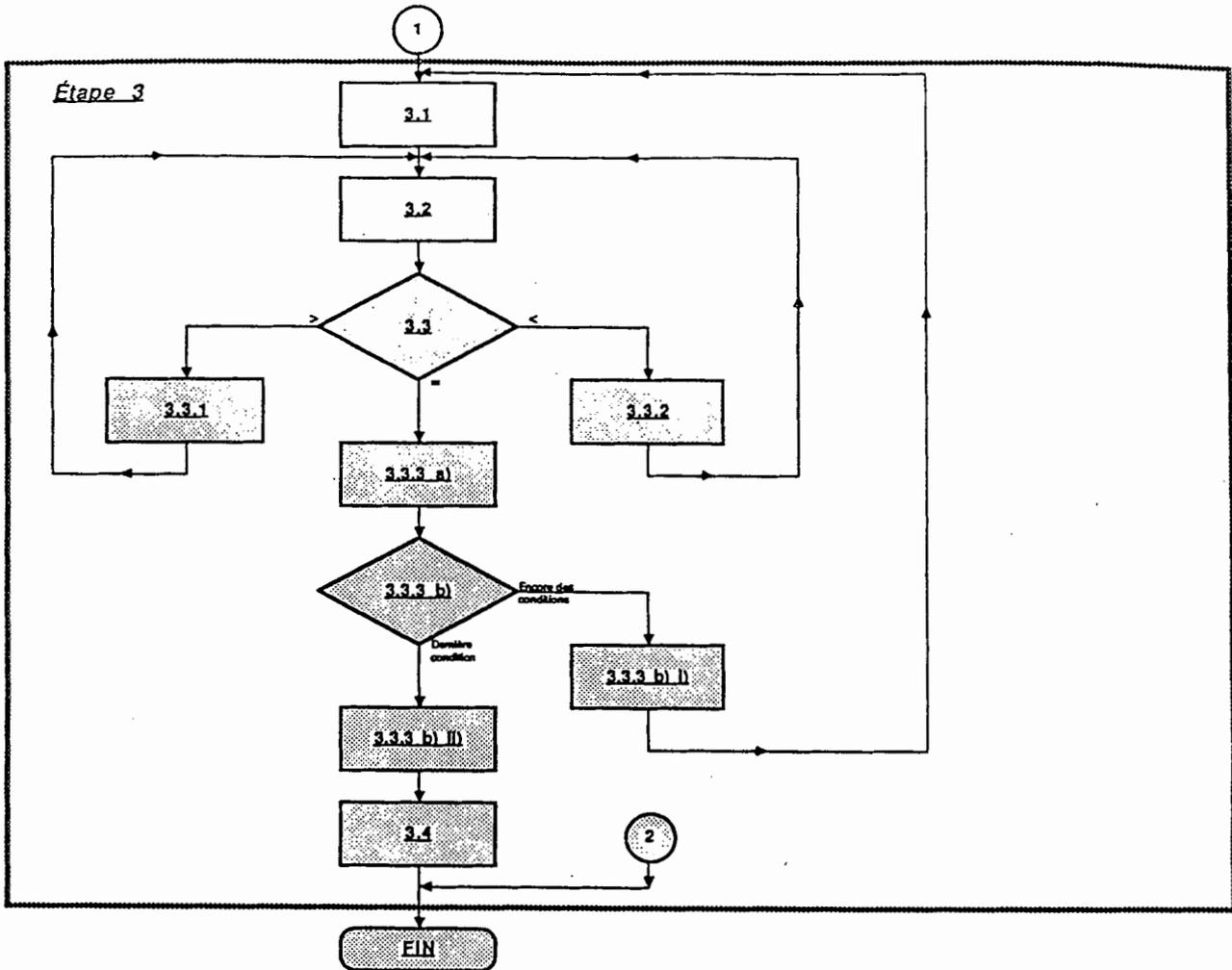
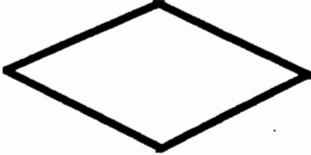


Tableau 5.1: Organigramme décisionnel de conception d'une unité HSS (suite)



	Tête et fin	Placé au début et à la fin de l'algorithme.
	Opération	Toute opération qui crée, modifie ou transfère des données.
	Branchement	Ce symbole a une ligne d'entrée et 2 ou plusieurs lignes de sortie; les résultats possibles sont écrits sur les lignes de sortie correspondantes.
	Connexion	Point à réunir à un symbole identique portant la même référence, sur la même feuille ou sur une autre.

**ETAPE 1**  
**Établissement de la superficie minimale nécessaire pour obtenir les rendements recherchés**

**1.1 Définir les critères de base suivants (pour chaque condition)**

- a) La température (t) de l'eau (en °C)
- b) La concentration recherchée en DBO<sub>5</sub> à la sortie (Cs) du système (en mg/l)
- c) Le débit moyen journalier d'eaux usées à l'entrée (Q) (en m<sup>3</sup>/s)
- d) La concentration en DBO<sub>5</sub> à l'entrée (Ce) du système (en mg/l)

e) Le rendement recherché =  $\left( \frac{C_e - C_s}{C_e} \right) \times 100$

**1.2 Calcul de la superficie minimale à l'aide de l'équation 5.1 et en considérant He = 0,9 m et Hs = 0,8 m**

$$K_t = 0,805 \times 1,06^{(t-20)}$$

$$S = \frac{3Q (H_e^2 - H_s^2) (\ln C_e - \ln C_s) \times 86\,400}{2 k_t \rho (H_e^3 - H_s^3)}$$

(Éq. 5.1)

### 1.3 Y-a-t-il encore des conditions à calculer (conditions à établir en 1.1)?

- a) Oui: Reprendre le processus à partir de l'étape 1.1 avec de nouvelles conditions.
- b) Non: Passer à l'étape 1.4.

### 1.4 Retenir la surface la plus grande parmi celles calculées à l'étape 1.2

## ÉTAPE 2

### Établissement de la longueur d'écoulement du lit

Pour chaque condition calculée à l'étape 1, procéder de la façon suivante:

#### 2.1 Hs = 0,8 m

#### 2.2 Calculer S à l'aide de l'équation 5.1

#### 2.3 Vérification de S calculé

##### 2.3.1 Si S calculé < S retenu en 1.4, vérification de Hs

###### 2.3.1.1 Si Hs > 0:

Diminuer Hs (il est recommandé de soustraire 0,1 m pour débiter) (Hs doit toujours être  $\geq 0$ ) et retourner à l'étape 2.2.

###### 2.3.1.2 Si Hs = 0:

- a) Pour ce cas, le rendement réel sera plus élevé que le rendement recherché et sera de:

Rendement réel =  $(1 - e^{-K_f Tr}) \times 100$  où

$$Tr = \frac{2 S \text{ retenu } \rho (He^3 - Hs^3)}{3 Q (He^2 - Hs^2) \times 86\,400}$$

- b) Calculer ensuite L à l'aide de l'équation 5.2.

- i) S'il y a encore des conditions à vérifier, recommencer le processus à partir de l'étape 2.1 avec de nouvelles conditions.

ii) Si c'était la dernière condition, passer à l'étape 2.4.

### 2.3.2 Si S calculé > S retenu en 1.4

Augmenter Hs (Hs doit toujours être  $\leq 0,9$  m) et retourner à l'étape 2.2.

### 2.3.3 Si S calculé = S retenu en 1.4

a) Calculer L à l'aide de l'équation 5.2.

$$L = \sqrt{\frac{K (H_e^2 - H_s^2) S}{2Q}} \quad (\text{Éq. 5.2})$$

b) i) S'il y a encore des conditions à vérifier, recommencer le processus à partir de l'étape 2.1 avec de nouvelles conditions.

ii) Si c'était la dernière condition, passer à l'étape 2.4.

## 2.4 Vérification des L calculés

### 2.4.1 Si tous les L calculés en 2.3 sont $\geq 3$

a) Retenir comme longueur du système le plus petit des L calculés à l'étape 2.3.

b) Retenir la superficie correspondante S calculée à l'étape 2.2.

c) Calculer la largeur du système b à l'aide l'équation:

$$b = \frac{S}{L}$$

et les dimensions du système sont ainsi toutes définies.

d) Fin.

### 2.4.2 S'il existe un L (calculé en 2.3) tel que $L < 3$

Passer à l'étape 3.

**ETAPE 3****Révision de la superficie nécessaire si on établit la longueur d'écoulement à 3 m**

*Note Cette étape est nécessaire si et seulement s'il existe un L calculé à l'étape 2.3 qui est inférieur à 3 m.*

Pour chaque condition dont le L calculé à l'étape 2.3 est inférieur à 3, procéder de la façon suivante:

**3.1 Hs = 0****3.2 Calculer L requis à l'aide de l'équation 5.3:**

$$L = \sqrt{\frac{3K (He^2 - Hs^2)^2 (\ln Ce - \ln Cs) \times 86\,400}{4 k_t \rho (He^3 - Hs^3)}} \quad (\text{Éq. 5.3})$$

**3.3 Vérification de L calculé****3.3.1 Si L calculé > 3**

Augmenter Hs (il est recommandé d'ajouter 0,1 m pour débuter) (Hs doit toujours être  $\leq 0,9$  m) et retourner à l'étape 3.2.

**3.3.2 Si L calculé < 3**

Diminuer Hs (Hs doit toujours être  $\geq 0$ ) et retourner à l'étape 3.2.

**3.3.3 Si L calculé = 3**

a) Calculer S à l'aide de l'équation 5.4:

$$S = \frac{2QL^2}{K (He^2 - Hs^2)} \quad (\text{Éq. 5.4})$$

b) i) S'il y a encore des conditions à vérifier, recommencer le processus à partir de l'étape 3.1 avec de nouvelles conditions.

ii) Si c'était la dernière condition, passer à l'étape 3.4.

### 3.4 Choisir la plus grande surface calculée à l'étape 3.3.3 avec $L = 3 \text{ m}$

a) Calculer ensuite la largeur  $b$  à l'aide de l'équation:

$$b = \frac{S}{L}$$

et les dimensions du système sont ainsi toutes définies.

b) Fin.

#### 5.3.5 Sélection du média filtrant

Le matériel utilisé doit préférablement être un sable et gravier dont le coefficient de perméabilité est supérieur à  $10^{-1} \text{ cm/s}$ . Celui-ci ne doit pas contenir de silt ni de pierre anguleuse. Si la longueur du système est trop courte, on devrait rechercher un sol plus perméable afin de pouvoir l'allonger. La conception finale des unités doit être réalisée après avoir retenu le matériau filtrant. Si la déphosphatation est envisagée, une légère quantité d'argile (5 à 10%) pourrait y être introduite afin d'améliorer les capacités d'adsorption du milieu mais les superficies et longueurs d'écoulement devront être ajustées en conséquence. Pour assurer un bon mélange, l'argile devrait être séchée et mise en poudre afin d'être incorporée au sable et gravier. Un matériau provenant d'une formation calcaire est préférable à un matériau de provenance granitique. Les matériaux granitiques sont très inertes et les capacités d'adsorption très faibles.

## **REFERENCES**

**LIENARD, ALAIN, 1991**

*Traitement des eaux usées domestiques par lits d'infiltration-Percolation sur sable-Étude expérimentale du site de Saint-Symphorien de Lay - Suivis et rapport définitif*

105 pages

**LIENARD, ALAIN ET ALL., 1990 c**

*Recueil d'articles*

**LIENARD, ALAIN, C. BOUTIN ET D. ESSER, 1990 a**

*Domestic wastewater treatment with emergent hydrophyte beds in France*

Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 183-192 pages

**LIENARD, ALAIN, D. ESSER, A. DEGUIN ET ALL., 1990 b**

*Sludge dewatering and drying in reed beds: an interesting solution? General investigation and first trials in France*

Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 257-268 pages

## 6. EXEMPLE DE CONCEPTION

Le présent chapitre vise à montrer la démarche à suivre pour concevoir un système de traitement d'eaux usées par marais artificiels. Prenons les rejets d'eaux usées d'une municipalité québécoise ayant une population de 800 personnes et une infiltration moyenne de 1 fois le débit d'eaux usées en été et de 0,5 fois le débit d'eaux usées en hiver. Voici les caractéristiques des eaux usées estivales et hivernales:

Période	Q moyen total <sup>(1)</sup> (m <sup>3</sup> /d)	DBO <sub>5</sub>		MES	
		(kg/d)	(mg/l)	(kg/d)	(mg/l)
Été	512	43,2	84,4	48,0	93,8
Hiver	384	43,2	112,5	48,0	125,0

(1) Incluant Q eaux usées et Q infiltration.

La conception est réalisée pour répondre aux objectifs de rejet suivants:

- 20 mg/l de DBO<sub>5</sub> en été;
- 25 mg/l de DBO<sub>5</sub> en hiver.

### 6.1 Sélection de la chaîne de traitement

La DBO<sub>5</sub> en hiver, après la fosse septique, est de 90 mg/l et se trouve donc près de 100 mg/l. En principe, il serait acceptable de construire un système avec seulement des unités HSS, mais pour les fins de l'exemple, nous allons le concevoir selon la chaîne de traitement présentée à la figure 5.3 (page 5-4) qui comprend une fosse septique, un répartiteur, un étage à écoulement vertical et un étage à écoulement horizontal sous la surface.

### 6.2 Dimensionnement de la fosse septique

#### A. *Volume de la fosse septique*

La fosse septique doit avoir un temps de résidence hydraulique, au débit journalier, de 24 heures. Elle aura donc un volume de 512 m<sup>3</sup>.

#### B. *Caractéristiques des effluents à la sortie de la fosse septique*

La charge et la concentration en DBO<sub>5</sub>, à la sortie de la fosse septique, sont les suivantes:

Période	% d'enlèvement	kg/d	mg/l
Été	40	25,9	50,6
Hiver	20	34,6	90,0

### 6.3 Dimensionnement de l'étage vertical

La superficie de l'étage vertical peut être contrôlée par la charge hydraulique ou la charge massique en DBO<sub>5</sub>. On retient la plus grande superficie des deux.

#### **A. Superficie nécessaire pour la charge hydraulique**

La charge hydraulique par unité ne doit pas dépasser 0,8 m/d.

$$S_1 = \frac{512 \text{ m}^3/\text{d}}{0,8 \text{ m/d}} = 640 \text{ m}^2/\text{unité}$$

$$S_{\text{TOT} 2} = 4 \times 640 \text{ m}^2 = 2\,560 \text{ m}^2$$

Chacune des 4 unités doit avoir 640 m<sup>2</sup>, pour une superficie nécessaire totale de l'étage vertical de 2 560 m<sup>2</sup>, pour répondre aux critères d'application hydraulique.

#### **B. Superficie nécessaire relative à la charge massique en DBO<sub>5</sub>**

La charge massique de l'ensemble de l'étage, soit des 4 unités, ne doit pas dépasser 40 g/m<sup>2</sup>·d. Considérant que la charge hivernale à la sortie de la fosse septique est plus élevée que la charge estivale, nous retenons cette première, soit 34,6 kg/d de DBO<sub>5</sub>. La superficie totale pour répondre à la charge massique est donc:

$$S_{\text{TOT} 2} = \frac{34,6 \text{ kg m}^2/\text{d} \times 1\,000}{40 \text{ g/m}^2/\text{d}} = 865 \text{ m}^2$$

#### **C. Superficie retenue**

La charge hydraulique devient le critère déterminant et les 4 unités auront chacune une superficie de 640 m<sup>2</sup> pour un total de 2 560 m<sup>2</sup>.

#### **D. Caractéristiques de l'effluent à la sortie de l'étage vertical**

Les rendements pour l'enlèvement de la DBO<sub>5</sub> dans un étage vertical sont établis sur la base des résultats obtenus à Oakland Park et Saint-Bohaire, soit à 50% en été. Pour des systèmes opérant par digestion facultative, il est généralement reconnu que les rendements d'hiver soient d'environ 30% inférieurs à ceux d'été. Tant que des résultats sur le terrain ne seront pas disponibles, nous suggérons de prévoir un rendement de 35% en hiver. Les caractéristiques des eaux usées à la sortie de l'unité verticale sont donc:

Période	DBO <sub>5</sub>	
	kg/d	mg/l
Été	13,0	25,3
Hiver	22,5	58,5

#### 6.4 Dimensionnement du répartiteur

Le volume efficace du répartiteur doit permettre l'envoi d'une couche de 100 mm d'eau en surface d'une unité. Le volume efficace est le volume d'eau compris entre la flotte de départ et la flotte d'arrêt. Le volume efficace du répartiteur est donc:

$$V_{\text{effluent}} = S_1 \times 0,1 \text{ m}$$

$$= 640 \text{ m}^2 \times 0,1 = 64 \text{ m}^3$$

#### 6.5 Dimensionnement de l'étage HSS

La superficie de l'unité HSS dépend des rendements recherchés et du temps de résidence hydraulique nécessaire. La longueur et la largeur minimales du système doivent être évaluées de telle sorte que les capacités hydrauliques et les rendements recherchés soient atteints.

VARIABLES CONNUES:

$$H_e = 0,9 \text{ m}$$

$$\rho = 0,26$$

$$K = 1 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$$

$$K_{20} = 0,805$$

Variable	Été	Hiver
T° (°C)	16	5
$K_t = K_{20} \times 1,06^{(t-20)} \text{ (d}^{-1}\text{)}$	$0,805 \times 1,06^{(16-20)} = 0,638$	$0,805 \times 1,06^{(5-20)} = 0,336$
Q (m <sup>3</sup> /s)	$5,93 \times 10^{-3}$	$4,44 \times 10^{-3}$
Ce (mg/l)	25,3	58,5
Cs (mg/l)	20	25

**ETAPE 1****Établissement de la superficie minimale nécessaire pour obtenir les rendements**

$$H_s = 0,8 \text{ m}$$

L'équation 5.1 sera utilisée pour déterminer la superficie requise dans chacun des cas. La superficie calculée la plus grande sera retenue.

$$S_{\text{été}} = \frac{3 \times 5,93 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} \times ((0,9 \text{ m})^2 - (0,8 \text{ m})^2) \times (\ln(25,3 \text{ mg/l}) - \ln(20,0 \text{ mg/l})) \times 86\,400 \text{ s/d}}{2 \times 0,638 \text{ d}^{-1} \times 0,26 \times ((0,9 \text{ m})^3 - (0,8 \text{ m})^3)}$$

$$S_{\text{été}} = \frac{61,38}{0,072} = 852 \text{ m}^2$$

$$S_{\text{hiver}} = \frac{3 \times 4,44 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} \times ((0,9 \text{ m})^2 - (0,8 \text{ m})^2) \times (\ln(58,5 \text{ mg/l}) - \ln(25,0 \text{ mg/l})) \times 86\,400 \text{ s/d}}{2 \times 0,336 \text{ d}^{-1} \times 0,26 \times ((0,9 \text{ m})^3 - (0,8 \text{ m})^3)}$$

$$S_{\text{hiver}} = \frac{166,49}{0,038} = 4\,387 \text{ m}^2$$

Donc,  $S_{\text{retenu}} = 4\,387 \text{ m}^2$

**ETAPE 2****Établissement de la longueur d'écoulement du lit****Sous-étape 2.1:**

Établissement de  $H_s$  minimal qui permet d'obtenir le rendement recherche

À l'aide de l'équation 5.1, déterminer la valeur de  $H_s$  nécessaire à chaque condition d'exploitation en utilisant la superficie retenue à l'étape 1. Avec cette équation, il est nécessaire de procéder par itération.

POUR L'HIVER:

Avec  $H_s = 0,8 \text{ m} \rightarrow S_{\text{hiver}} = 4\,387 \text{ m}^2 = S_{\text{retenu}}$  à l'étape 1

Donc, pour l'hiver  $H_s = 0,8 \text{ m}$

POUR L'ÉTÉ:

Avec  $H_s = 0,8 \text{ m} \rightarrow S_{\text{été}} = 852 \text{ m}^2$  (calculé à l'étape 1), donc il faut abaisser  $H_s$  pour obtenir une superficie supérieure.

Essayons avec  $H_s = 0,5$  m:

$$S = \frac{3 \times 5,93 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} \times ((0,9 \text{ m})^2 - (0,5 \text{ m})^2) \times (\ln(25,3 \text{ mg/l}) - \ln(20,0 \text{ mg/l})) \times 86\,400 \text{ s/d}}{2 \times 0,638 \text{ d}^{-1} \times 0,26 \times ((0,9 \text{ m})^3 - (0,5 \text{ m})^3)}$$

$S = 1\,008 \text{ m}^2 < S_{\text{retenu}}$  à l'étape 1.

Essayons avec  $H_s = 0,2$  m:

$$S = \frac{3 \times 5,93 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} \times ((0,9 \text{ m})^2 - (0,2 \text{ m})^2) \times (\ln(25,3 \text{ mg/l}) - \ln(20,0 \text{ mg/l})) \times 86\,400 \text{ s/d}}{2 \times 0,638 \text{ d}^{-1} \times 0,26 \times ((0,9 \text{ m})^3 - (0,2 \text{ m})^3)}$$

$S = 1\,162 \text{ m}^2 < S_{\text{retenu}}$  à l'étape 1.

Essayons avec  $H_s = 0,0$  m (c'est à dire avec l'élément de contrôle de niveau abaissé à son niveau minimal):

$$S = \frac{3 \times 5,93 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} \times ((0,9 \text{ m})^2 - (0,0 \text{ m})^2) \times (\ln(25,3 \text{ mg/l}) - \ln(20,0 \text{ mg/l})) \times 86\,400 \text{ s/d}}{2 \times 0,638 \text{ d}^{-1} \times 0,26 \times ((0,9 \text{ m})^3 - (0,0 \text{ m})^3)}$$

$S = 1\,208 \text{ m}^2 < S_{\text{retenu}}$  à l'étape 1, donc en été, le rendement réel sera meilleur que le rendement recherché pour la superficie retenue. En effet:

$$\begin{aligned} \text{rendement recherché} &= \frac{(C_e - C_s) \times 100}{C_e} \\ &= \frac{(25,3 - 20,0) \times 100}{25,3} \\ &= 21\% \end{aligned}$$

rendement réel (avec  $S = 4\,387 \text{ m}^2$  et  $H_s = 0$  m) =  $1 - e^{-K \times Tr}$

où

$$Tr = \frac{2 S \rho (H_e^3 - H_s^3)}{3 Q (H_e^2 - H_s^2)}$$

$$Tr = \frac{2 \times 4\,387 \text{ m}^2 \times 0,26 \times ((0,9 \text{ m})^3 - (0,0 \text{ m})^3)}{3 \times 5,93 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} \times ((0,9 \text{ m})^2 - (0,0 \text{ m})^2) \times 86\,400 \text{ s/d}}$$

$$Tr = 1,336 \text{ d}$$

$$\begin{aligned} \text{rendement réel} &= (1 - e^{-0,638 \text{ d}^{-1} \times 1,336}) \times 100 \\ &= 57\% \end{aligned}$$

**Sous-étape 2.2:**

Calcul de la longueur minimale pour chacune des conditions

Établir, pour chacune des conditions d'exploitation et à partir du Hs correspondant, la longueur minimale du système avec l'équation 5.2.

POUR L'HIVER:

Hs = 0,8 m (Hs calculé en 2.1)

S<sub>retenu</sub> = 4 387 m<sup>2</sup>

$$L = \sqrt{\frac{1 \times 10^{-2} \text{ cm/sec} \times ((0,9 \text{ m})^2 - (0,8 \text{ m})^2) \times 4\,387 \text{ m}^2}{200 \times 4,44 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}}}$$

L = 2,90 m < 3 m (donc, il faudra passer à l'étape 3).

POUR L'ÉTÉ:

Hs = 0 m (Hs calculé en 2.1)

S<sub>retenu</sub> = 4 387 m<sup>2</sup>

$$L = \sqrt{\frac{1 \times 10^{-2} \text{ cm/sec} \times ((0,9 \text{ m})^2 - (0,0 \text{ m})^2) \times 4\,387 \text{ m}^2}{200 \times 5,93 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}}}$$

L = 5,48 > 3 m

**ETAPE 3**

**Révision de la superficie nécessaire si on établit la longueur d'écoulement à 3 m**

**Sous-étape 3.1:**

Calcul du Hs minimal nécessaire pour obtenir le rendement recherché

Comme une longueur inférieure à 3 m n'est pas recommandable (afin d'éviter les écoulements préférentiels et les risques de courts-circuits), il est nécessaire de réviser la superficie du système en utilisant comme longueur retenue L = 3 m. Avec l'équation 5.3, il est possible de déterminer Hs (0 ≤ Hs < 0,9) tel que L = 3 m pour les cas où L < 3 m à l'étape 2.2.

POUR L'HIVER:

Avec Hs = 0,8 m, L = 2,9 m. Il faut donc trouver un Hs tel que L = 3,0 m.

Essayons avec Hs = 0,7 m:

$$L = \sqrt{\frac{3 \times 1 \times 10^{-2} \text{ cm/sec} \times ((0,9 \text{ m})^2 - (0,7 \text{ m})^2)^2 \times (\ln(58,5 \text{ mg/l}) - \ln(25,0 \text{ mg/l})) \times 86\,400 \text{ s/d}}{400 \times 0,336 \text{ d}^{-1} \times 0,26 \times ((0,9 \text{ m})^3 - (0,7 \text{ m})^3)}}$$

$L = 4,09 \text{ m} > 3 \text{ m}$ , il faut augmenter Hs.

Essayons avec  $H_s = 0,79 \text{ m}$ :

$$L = \sqrt{\frac{3 \times 1 \times 10^{-2} \text{ cm/sec} \times ((0,9 \text{ m})^2 - (0,79 \text{ m})^2)^2 \times (\ln(58,5 \text{ mg/l}) - \ln(25,0 \text{ mg/l})) \times 86\,400 \text{ s/d}}{400 \times 0,336 \text{ d}^{-1} \times 0,26 \times ((0,9 \text{ m})^3 - (0,79 \text{ m})^3)}}$$

$L = 3,04 \text{ m} > 3 \text{ m}$ , il faut augmenter Hs.

Essayons avec  $H_s = 0,793 \text{ m}$ :

$$L = \sqrt{\frac{3 \times 1 \times 10^{-2} \text{ cm/sec} \times ((0,9 \text{ m})^2 - (0,793 \text{ m})^2)^2 \times (\ln(58,5 \text{ mg/l}) - \ln(25,0 \text{ mg/l})) \times 86\,400 \text{ s/d}}{400 \times 0,336 \text{ d}^{-1} \times 0,26 \times ((0,9 \text{ m})^3 - (0,793 \text{ m})^3)}}$$

$L = 3,00 \text{ m}$ .

### Sous-étape 3.2:

Détermination de la superficie nécessaire si  $L = 3 \text{ m}$

$H_s = 0,793 \text{ m}$

$L = 3 \text{ m}$

$$S = \frac{200 \times 4,44 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} \times (3 \text{ m})^2}{1 \times 10^{-2} \text{ cm/sec} \times ((0,9 \text{ m})^2 - (0,793 \text{ m})^2)}$$

$S = 4\,405 \text{ m}^2$

On retient donc  $S = 4\,405 \text{ m}^2$  comme superficie minimale avec une longueur de  $3,0 \text{ m}$  et une largeur de  $b = \frac{4\,405 \text{ m}^2}{3,0 \text{ m}} = 1\,468,18 \text{ m}$ .

L'étape HSS pourrait donc mesurer  $70 \text{ m} \times 63 \text{ m}$  (superficie de milieu filtrant) et comprendre 21 rangées de  $3 \text{ m}$  de largeur et  $70 \text{ m}$  de longueur.

## **7. SÉLECTION DES OUVRAGES CONNEXES**

### **7.1 Imperméabilisation**

Si le terrain en place est argileux et le coefficient de perméabilité est inférieur à  $10^{-7}$  cm/s, il n'est pas nécessaire d'imperméabiliser les marais. Une perte par exfiltration d'environ 20% du débit est, à notre avis, acceptable s'il n'y a pas d'usage de la nappe souterraine dans les environs. En d'autres cas, il faut envisager une imperméabilisation avec de l'argile ou une membrane imperméabilisante synthétique. Considérant les faibles têtes d'eau impliquées et l'imbrication de l'argile entre le sol en place et le média filtrant, nous recommandons de construire le fond avec une couche de 0,3 m d'argile. De plus, les risques d'exfiltration au pied des talus sont faibles car les talus auront une hauteur maximale de 0,6 à 0,9 m sauf si les travaux sont exécutés dans des pentes fortes et alors une étude géotechnique approfondie pourra établir exactement les besoins.

La réalisation de côtés verticaux tels que montrés à la figure 7.1 est recommandée. Le média filtrant et l'argile pourraient être posés en couche de 300 à 500 mm pour permettre la réalisation de talus verticaux tels que montrés à la figure 7.1. Si cette procédure s'avère difficile, on pourrait envisager l'usage de géomembranes.

### **7.2 Répartiteur**

Le répartiteur est utile seulement lorsque des étages avec unités verticales sont construits, car l'alimentation des unités verticales doit être intermittente. Chacune des unités est équipée d'une vanne électromagnétique à l'entrée qui est contrôlée avec un automate programmable afin de pouvoir gérer des alimentations d'une période de 6 à 48 heures. Les unités sont alimentées de façon séquentielle une à une.

Durant la période d'alimentation d'une unité, il est recommandé de fournir un débit important de temps à autre pour assurer une bonne couverture de l'unité et une répartition de l'eau sur l'ensemble de sa surface. Le répartiteur permettra d'acheminer un volume égal à un maximum de 0,1 m multiplié par la surface de l'unité à partir de flottes d'arrêt et de départ ajustables. La capacité des pompes ou du système gravitaire doit permettre la vidange totale du répartiteur sur une période d'environ 15 minutes. L'ajustement des flottes doit permettre des alimentations pouvant varier d'environ 8 à 40 par jour, ce qui permettra de couvrir la surface à chaque vague de 20 à 100 mm.

### **7.3 Équipements de contrôle de niveau**

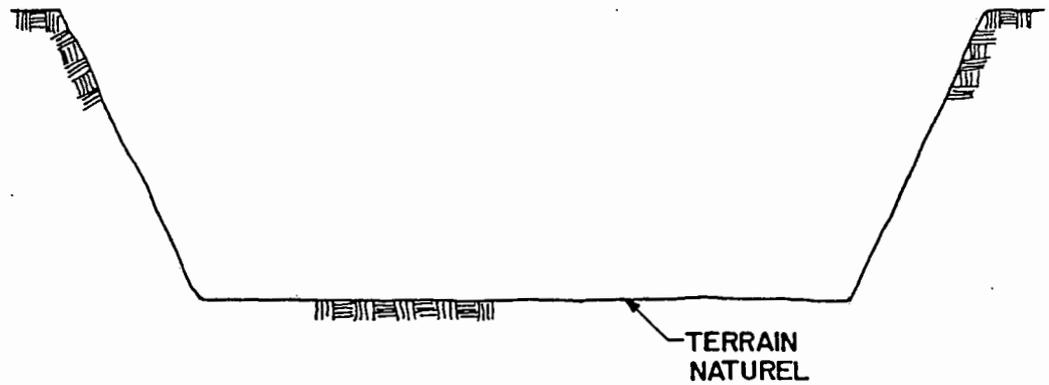
Chaque unité verticale et unité HSS doit être suivie par un équipement de contrôle de niveau. La figure 7.2 suggère une configuration de chambre de contrôle de niveau simple et fonctionnelle. Des conduites dont l'extrémité est souple peuvent être relevées ou abaissées à l'aide d'un treuil manuel ou électrique de façon à maintenir le niveau dans les unités au seuil recherché. L'eau traitée peut, par la suite, traverser un déversoir en V afin de permettre une mesure de débit approximative.

FIGURE 7.1

**SCHÉMA D'INSTALLATION  
DE LA MEMBRANE D'ARGILE**

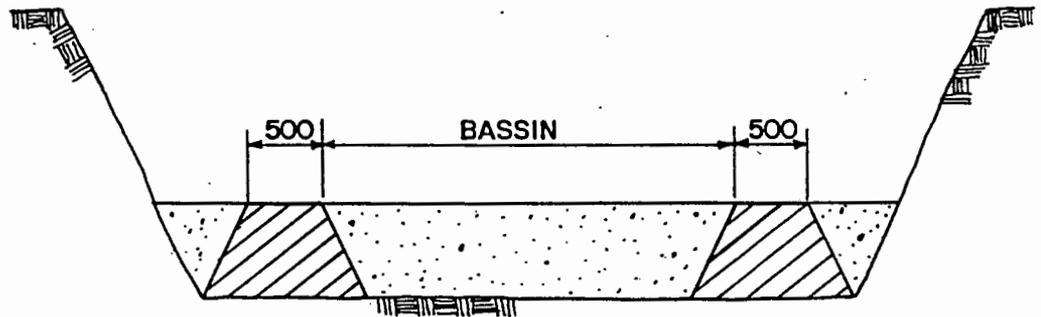
**ETAPE N°1**

Creusage du bassin



**ETAPE N°2**

Remplissage d'une couche d'argile et remblai de sable de chaque côté



**ETAPE N°3**

Continue les étapes par couches pour obtenir le produit final suivant

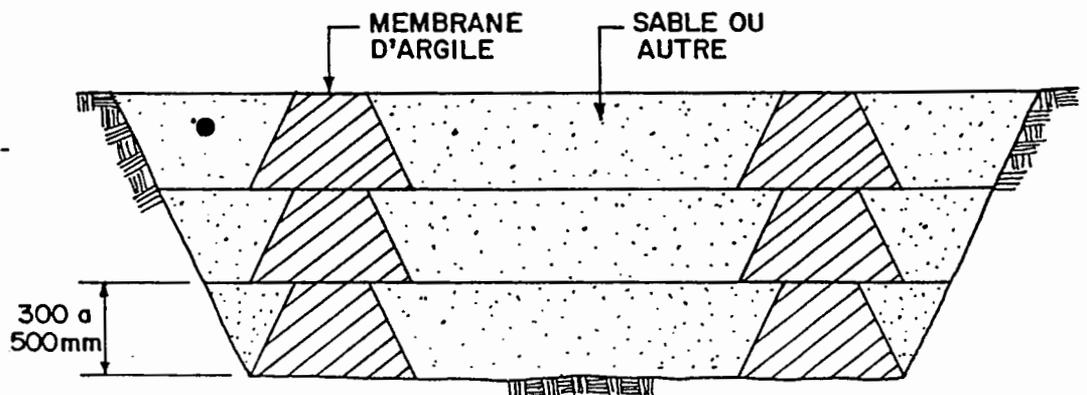
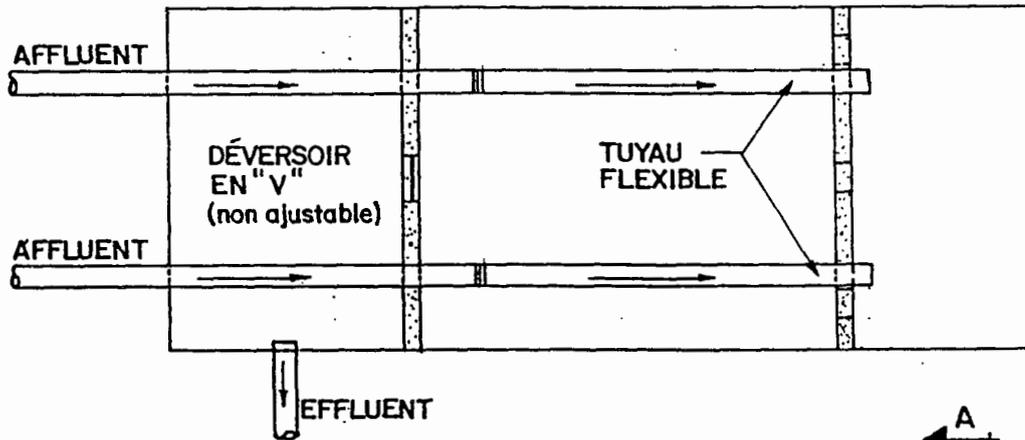


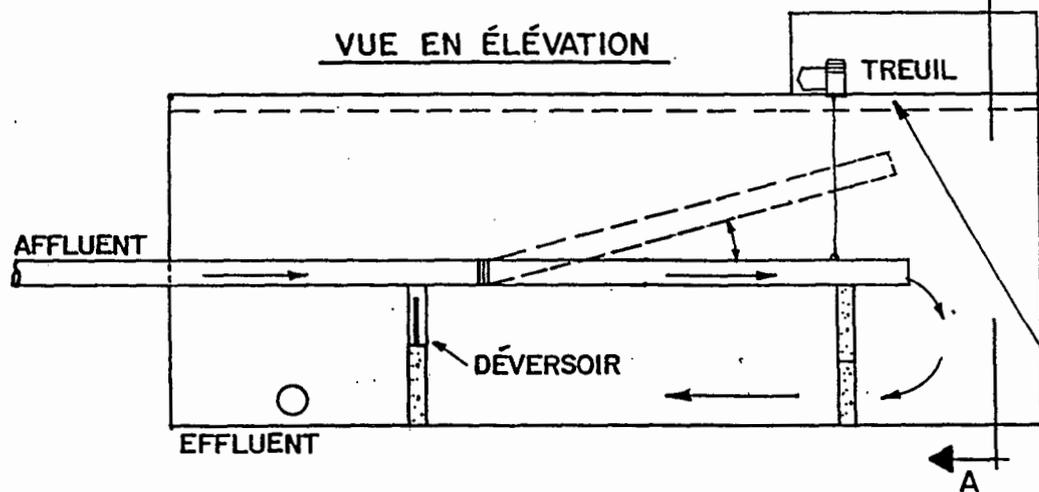
FIGURE 7.2

CHAMBRE DE CONTRÔLE DE NIVEAU

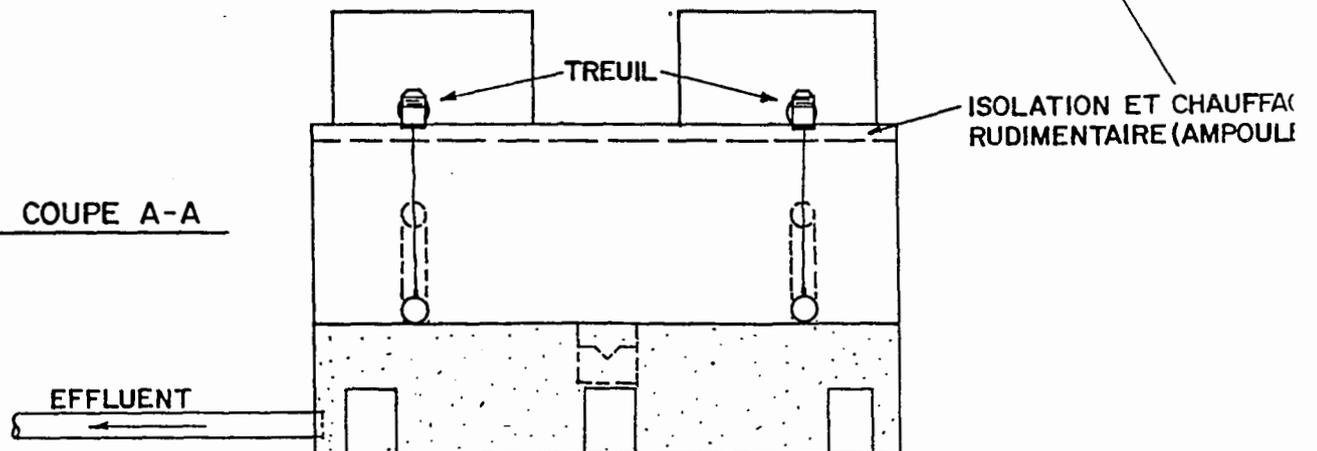
VUE EN PLAN



VUE EN ÉLÉVATION



COUPE A-A



Les unités verticales opèrent normalement sans contrôle de niveau pour maintenir des conditions aérobies dans le système. Les chambres de contrôle peuvent permettre de noyer l'unité durant la période hivernale, afin de contrôler la croissance de graminées au printemps en inondant la surface du marais. Considérant les besoins sporadiques de contrôle de niveau, ceux-ci peuvent être opérés de façon manuelle.

Afin d'optimiser l'exploitation et la conception des unités HSS, il est nécessaire de maintenir la nappe d'eau près de la surface. Lorsque le débit diminue, on constate fréquemment, dans les réseaux municipaux, une augmentation de la concentration en DBO<sub>5</sub>. Il est alors possible de rehausser le niveau à la sortie du marais, ce qui permet d'augmenter le temps de résidence hydraulique et ainsi l'efficacité du système, tout en assurant une capacité hydraulique adéquate. Lorsque, par contre, le débit augmente, on observe fréquemment une diminution de la concentration en DBO<sub>5</sub>. Il faut alors rabaisser le contrôle de niveau pour augmenter la capacité hydraulique de l'unité et éviter un écoulement en surface.

Un petit treuil électrique, installé sur la conduite de contrôle de niveau, pourrait être contrôlé par un lecteur de niveau à ultrasons installé dans un piézomètre situé environ à 1 m en aval de la tranchée d'alimentation. Ce lecteur de niveau permettrait de vérifier le niveau de nappe dans le champ de roseaux (*Phragmites australis*) et de commander un rehaussement ou un abaissement, si nécessaire, du système de contrôle de niveau. Le niveau d'eau dans le piézomètre devrait être maintenu entre 0,05 et 0,15 m sous la surface. Lorsque la nappe phréatique serait à une distance inférieure à 0,05 m de la surface, la sonde à ultrasons enverrait un signal au treuil électrique pour abaisser le contrôle de niveau d'environ 0,1 m. Lorsque la nappe phréatique serait à un niveau inférieur à 0,15 m de la surface, le contrôle de niveau devrait être rehaussé de 0,1 m. Une horloge ajustable entre 1 h 00 et 48 h 00 permettra d'ajuster la fréquence des commandes selon la vitesse de réaction du système.

#### **7.4 Conduites de contournement et trop-pleins**

En principe, il doit être possible de contourner tous les étages du système et isoler une unité pour l'entretenir sans affecter de façon importante le traitement. Les figures 5.1 à 5.3 (pages 5-2 à 5-4) montrent le schéma d'écoulement des différents types de système. La figure 5.3 (page 5-4) présente le système le plus complexe composé de deux étages verticaux et un étage HSS. Les conduites doivent permettre de contourner:

- la fosse septique vers le répartiteur;
- le premier étage vertical vers le deuxième étage vertical;
- le premier étage vertical vers l'étage HSS;
- le deuxième étage vertical vers l'étage HSS;
- une unité de l'étage HSS vers l'autre unité de l'étage HSS.

Certains équipements doivent être équipés de trop-pleins afin d'éviter les risques de débordement potentiel. Il s'agit du répartiteur au cas où un bris mécanique surviendrait, et des étages verticaux dont la capacité hydraulique est limitée et qui pourrait occasionner un débordement. Il n'est pas utile

d'installer un trop-plein sur les étages HSS car, en cas de surcharge hydraulique, l'écoulement se fera en surface des unités et n'occasionnera pas de bris du système. Il a d'ailleurs été constaté, à plusieurs endroits, des rendements acceptables même durant les périodes d'écoulement de surface.

### 7.5 Bâtiment

Il serait avantageux de prévoir la construction d'un petit entrepôt d'environ 4 m X 4 m pour y installer les contrôles électriques, l'automate programmable, les quelques appareils de laboratoire et le matériel utile à l'opérateur. Si l'eau potable est disponible à proximité, un évier pourrait être envisagé mais celui-ci n'est pas essentiel.

### 7.6 Besoins électriques et d'automatisation

Les besoins en consommation électrique sont très faibles et se résument en l'exploitation des vannes électromagnétiques et des pompes à faibles têtes si celles-ci s'avèrent nécessaires pour alimenter les marais.

Un petit automate programmable équipé d'une horloge et de quelques contacts pour permettre la commande d'ouverture et de fermeture des vannes, le démarrage et l'arrêt des pompes ainsi que le relèvement et l'abaissement du treuil de contrôle de niveau des unités HSS est nécessaire.

### 7.7 Ouvrages de protection et d'aménagement

La constitution d'un rideau composé de deux rangées d'arbres est recommandée. Celui-ci permet de restreindre le déplacement des graines du roseau (*Phragmites australis*) à l'extérieur du milieu planté et assure un couvert ombragé non favorable à la croissance des roseaux (*Phragmites australis*) à l'extérieur du marais artificiel. Les arbres, durant l'hiver, atténueront le facteur de gel dû aux vents et favoriseront une accumulation de neige sur la surface du marais artificiel qui le protégera contre le gel. Une première rangée de feuillus, composés de saules (*Salix sp.*) ou d'aulnes (*Alnus sp.*), pourrait être implantée à environ 5 m de la rive des marais artificiels. Une seconde rangée de conifères, tels que des épinettes, pourrait être installée légèrement à l'extérieur des feuillus. Bien que ces aménagements ne soient pas essentiels, ils pourraient représenter une amélioration peu coûteuse du système de traitement.

### 7.8 Clôture

Une clôture de type Sentinelle devrait ceinturer les marais artificiels. Bien que les risques de noyade dans ces unités soient négligeables comparativement aux étangs aérés, il est nécessaire d'éviter que soient détériorés les champs de roseaux (*Phragmites australis*) et les équipements.

Ceci s'applique par exemple dans les secteurs où l'on retrouve des cervidés. En effet, ces animaux semblent apprécier la consommation de plants de roseaux (*Phragmites australis*), ce qui peut avoir pour effet de ravager les champs.

## 7.9 Accès

Un chemin doit permettre l'accès au site, principalement à la fosse septique pour en permettre une vidange régulière. Les marais doivent tous être accessibles par un tracteur de ferme.

## 7.10 Besoins en eau

L'approvisionnement en eau des marais n'est pas essentiel mais pourrait être avantageux si l'alimentation hivernale devient trop faible afin d'éviter le gel dans le milieu filtrant et de maintenir les unités verticales noyées.

## 7.11 Sélection des plantes

Le roseau commun (*Phragmites australis*) est parfaitement approprié à cet usage sauf s'il n'existe pas dans la région où le système doit être implanté.

Les plantes doivent idéalement être cueillies dans la même région que celle où est construit le marais artificiel. Il ne faut pas cueillir ces roseaux (*Phragmites australis*) dans un milieu naturel sans autorisation spéciale du ministère de l'Environnement du Québec. En général, le roseau (*Phragmites australis*) croît dans des milieux perturbés, tels que les fossés de route, et peut être cueilli dans ces secteurs. Il est possible de cueillir des plantules de 150 à 300 mm au printemps et de s'assurer que soit rattaché un rhizome ayant au moins trois noeuds (environ 300 mm de long).

Il est aussi possible d'ensemencer des lits de roseaux (*Phragmites australis*) à partir de plantules dont la croissance est effectuée en serre à l'aide de graines (voir Parr, 1987).

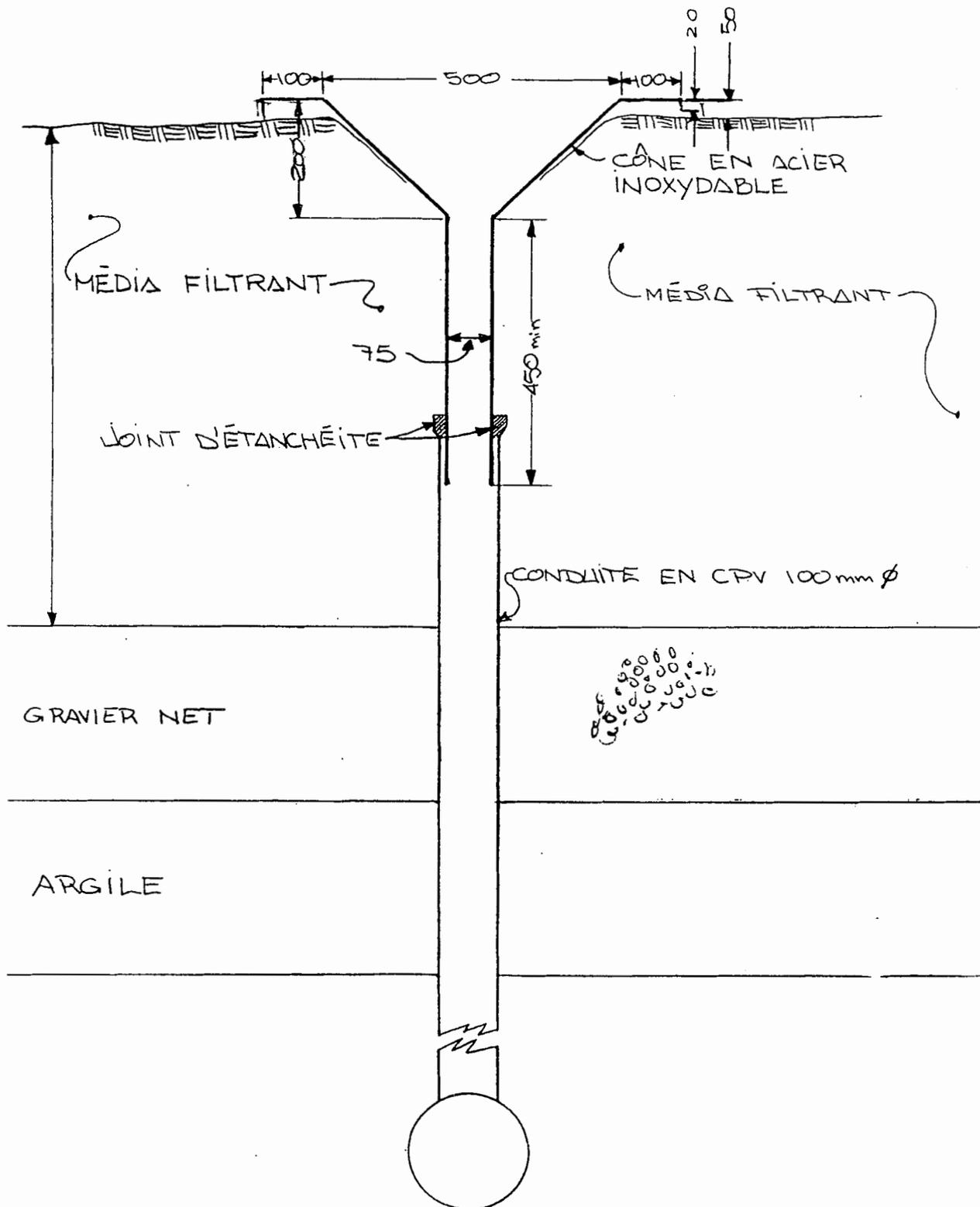
L'usage de plantules cueillies sur place, à partir de colonies peu fertiles, devrait être favorisé lorsque possible (Villeneuve et al, 1992).

## 7.12 Alimentation des unités verticales

L'alimentation des unités verticales sera assurée par une série de cônes d'alimentation telle que présentée à la figure 7.3. Nous recommandons l'installation d'un cône par 50 m<sup>2</sup> de filtre. Le dimensionnement des conduites doit être ajusté afin d'assurer une bonne répartition des débits entre les différents cônes d'alimentation. Durant l'hiver, la formation d'une petite couche de glace sur le cône ne devrait pas occasionner de blocage du système. Suite à l'expérience vécue à Saint-Vianney, nous recommandons de raccourcir les périodes d'alimentation durant la période hivernale. Si ce type d'alimentation est problématique en hiver, il serait aussi possible d'envisager l'implantation d'un réseau de distribution à faibles pressions enfoui dans un lit de copeaux de cèdre qui recouvre le sable et permet de mieux protéger contre le gel. Cette dernière solution plus dispendieuse ne sera pas nécessaire car, à notre avis, les plantes séchées créent une zone de protection contre le gel intéressante.

FIGURE 7.3

## Détail type de l'alimentation des unités verticales



# REFERENCES

**VILLENEUVE, R. ET AL, 1992 c**

*Contribution à la compréhension de l'écologie des phragmites (roseaux) au Québec - V.1.3 - Volume 3*  
Consultants RSA

**VILLENEUVE, R. ET AL, 1992 b**

*Contribution à la compréhension de l'écologie des phragmites (roseaux) au Québec - V.1.3 - Volume 2*  
Consultants RSA

**VILLENEUVE, R. ET AL, 1992 a**

*Contribution à la compréhension de l'écologie des phragmites (roseaux) au Québec - V.1.3 - Volume 1*  
Consultants RSA, 59 pages

## 8. CONSTRUCTION ET MISE EN SERVICE

Le présent chapitre traite des aspects de la construction et de la mise en service des marais artificiels. Les travaux semblables à ceux nécessaires pour les étangs aérés, tels que l'imperméabilisation ou les conduites interconnectrices, ne sont pas évalués.

### 8.1 Matériaux filtrants

Le choix et la pose du matériau filtrant sont fondamentaux pour assurer une bonne exploitation du système et une uniformité de l'écoulement. Pour ce faire, nous recommandons la vérification régulière de la granulométrie de chaque type de matériau à tous les 500 m<sup>3</sup> ou à tous les changements d'unités de traitement. Si la granulométrie du matériau varie de façon importante, il faudra vérifier le coefficient de perméabilité et exiger les correctifs qui s'imposent.

Tous les matériaux filtrants doivent être posés avec des équipements légers et on doit éviter toute compaction. Si le matériau semble trop dense, l'entrepreneur devra passer un rotoculteur et le régaler par la suite.

### 8.2 Régalage

Pour assurer une bonne couverture de l'eau usée sur les unités verticales et éviter les courts-circuits des unités HSS, le régalinge de la surface doit être très régulier. Des variations de plus de 50 mm ne peuvent être tolérées. S'il y a formation de légers sillons, ceux-ci doivent être orientés de façon radiale à partir du point d'alimentation vers l'extérieur pour l'unité verticale et perpendiculaire à la direction d'écoulement pour les unités HSS.

### 8.3 Plantation des roseaux (*Phragmites australis*)

#### A. Généralités

Il faut de 3 à 5 ans avant que la couverture végétale soit parfaitement établie. Durant cette période, et principalement durant la première année, une attention particulière doit être assurée pour permettre une bonne croissance des plantes. Nous suggérons qu'un entrepreneur spécialisé soit responsable de la première année de croissance.

Il existe quatre méthodes normalement utilisées pour l'implantation d'un couvert végétal (*Phragmites*, *Typha* ou autres). Deux de celles-ci utilisent les graines comme mode de propagation, une troisième des boutures et la quatrième utilise les rhizomes.

#### B. Implantation du couvert végétal par semis

Les graines de roseaux (*Phragmites australis*) sont très petites (jusqu'à 7 500 graines/g). Habituellement, cueillies au début de l'automne sur des plantes fertiles, les graines sont mises en terre et cultivées en serre de verre.

Les graines sont d'abord mises dans un compost humide et repiquées après avoir atteint une hauteur variant de 5 à 10 cm. La température à laquelle sont conservés les semis varie habituellement de 25 à 30°C le jour (durée 16 heures) et est abaissée de 10°C (15-20°C) durant la nuit (≈8 heures).

Les jeunes plants sont transplantés directement dans le média filtrant au début de l'été si ceux-ci ont atteint le degré de germination suffisant en fin de période hivernale. Le taux de transplantation est de 4 plants/m<sup>2</sup>, ce qui garantit habituellement un bon couvert à l'automne.

Le niveau d'eau est alors maintenu de 10 à 50 mm au-dessus du niveau du sol. L'utilisation d'engrais (NPK) peut être envisagée si les plants ne sont pas tout de suite alimentés en eaux usées. Si les eaux usées ne sont pas disponibles, il est possible que des arrosages sporadiques soient nécessaires pour maintenir le niveau d'eau.

La culture en serre offre l'avantage principal d'allonger la saison de pousse des plantes. Ce facteur est important, particulièrement dans les régions situées plus au NORD. Les producteurs en serre sont peu nombreux et travaillent actuellement sur des types de plante utilisés presque exclusivement en horticulture ornementale.

Si on prévoit utiliser des plantules développées en serre, il est nécessaire que celles-ci soient préparées environ une année à l'avance. En effet, les graines doivent être récoltées à l'automne et les plantules peuvent être préparées au printemps ou durant la période estivale.

L'état de santé générale des plantules doit être vérifié juste avant la plantation.

### ***C. Implantation du couvert végétal par semence directe***

La semence directe se fait à partir de têtes de fleurs brisées en petits morceaux, dispersés uniformément sur le bassin de filtration, en garantissant un taux de dispersion de 100 graines/m<sup>2</sup>.

Cette méthode nécessite la présence d'un sol arable ou d'un compost humide en surface afin de permettre la croissance des semis.

Le sol est ensuite roulé de façon à créer un bon contact des graines avec le sol sans toutefois les enterrer. Parmi les autres soins requis par cette méthode, notons le maintien dans des conditions humides et non submergées du sol, la mise en place d'une pellicule transparente de polyéthylène pour les 2 à 3 premières semaines, ainsi qu'une fertilisation et un cerclage régulier.

Le niveau d'eau est habituellement rehaussé de 50 mm, lorsque les repousses ont atteint une hauteur plus grande que 100 mm, et maintenu à ce niveau quelques mois.

#### **D. Implantation du couvert végétal par boutures**

Les boutures sont également utilisées pour la plantation des roseaux (*Phragmites australis*). Elles doivent être récoltées au début de l'été lorsque les repousses ont de 500 à 1 000 mm de hauteur. Les tiges sont coupées à approximativement 50 mm au-dessus du sol et en même temps sous un noeud mature.

La tige est ensuite libérée des feuilles excédentaires jusqu'à obtenir une tige d'approximativement 30 cm de longueur incluant un minimum de trois noeuds et, par la suite, insérée dans un compost humide (en serre).

Lorsque les tiges ont formé un réseau de racines suffisant ainsi que quelques repousses, soit normalement après une période de trois semaines, les plants sont retransplantés à l'extérieur le plus tôt possible en début d'été avec un taux de transplantation de 6 à 8 plants/m<sup>2</sup>. Le taux de succès pour la reprise des tiges est relativement bon et varie habituellement de 40 à 60%.

#### **E. Implantation du couvert végétal par transplantation de rhizomes**

La transplantation des rhizomes représente la quatrième méthode d'implantation du roseau (*Phragmites australis*). Cette méthode a d'ailleurs déjà été utilisée à Saint-Vianney au cours du printemps 1992.

Les rhizomes peuvent être prélevés presque en n'importe quelle période de l'année mais de préférence au printemps. Les rhizomes doivent être petits et avoir une ou deux repousses.

Les rhizomes sont mis en terre dans le média filtrant obliquement avec une portion des repousses au-dessus de l'eau. Encore une fois, l'eau est habituellement conservée le plus haut possible, soit près de 5 cm au-dessus du sol. Ceci permet de mieux contrôler les mauvaises herbes, de minimiser l'effet du gel tardif et d'éviter un état de sécheresse prématuré.

La disponibilité d'importantes réserves de roseaux (*Phragmites australis*) en milieu perturbé, dans presque toutes les régions du Québec, permet une source locale idéale pour le prélèvement des rhizomes.

Il suffit de localiser, à l'automne, le lieu d'emprunt et d'en effectuer la collecte au printemps suivant.

L'ajout de nutriments est encore une fois nécessaire si les plantes ne sont pas immédiatement alimentées avec des eaux usées et, de façon encore plus particulière, si le sol dans lequel sont transplantés les roseaux (*Phragmites australis*) est un gravier.

Lors de ses recherches sur la propagation et l'établissement des colonies de roseaux (*Phragmites australis*) (Parr, T.W., 1987), Parr a évalué l'apport de nutriments nécessaires à la croissance des roseaux (*Phragmites australis*) et il est de:

- 400 kg N/ha/an
- 25 kg P/ha/an
- 50 kg K/ha/an

Parr précise également que l'apport en azote dans les eaux usées semble être suffisant, mais pas toujours sous une forme accessible pour les plantes. Nous n'avons relevé aucun cas dans la littérature qui ait observé une différence en azote des systèmes de traitement d'eaux usées.

## **F. Commentaires**

Parmi les systèmes présentés, les méthodes de semences directes et de boutures demandent une quantité importante de soins. Celles-ci sont donc, selon nous, plus difficiles à exécuter et à intégrer lors de la mise en exploitation d'un système de traitement avec marais artificiels (ex.: délais, niveau d'inondation, mise en place de polyéthylène, etc.).

Les méthodes de semis et de transplantation des rhizomes constituent, selon nous, les deux méthodes les mieux adaptées et qui doivent être priorisées actuellement au Québec.

Le débit d'apport doit être maintenu faible durant la première année de croissance pour éviter la formation de rigoles et l'arrachement des plantes avant qu'elles ne soient bien implantées. Si on constate la croissance d'autres graminées, il est recommandé de rehausser le niveau à environ 50 mm au-dessus de la surface du sol durant 3 à 4 semaines. Il est très important de vérifier, au printemps des années subséquentes, s'il y a présence d'autres graminées sur la surface du marais et d'éviter leur croissance. Durant les premières années, il est important d'éviter que les jeunes plantules ne soient étouffées par des graminées plus hâtives. Lorsque le champ de roseaux (*Phragmites australis*) est bien implanté, il réussit à maintenir un milieu monospécifique.

Si des secteurs des marais ont moins bien poussé que d'autres, il serait possible de récolter des plantules dans le secteur mieux développé et de les transplanter dans les zones plus faibles.

## REFERENCES

PARR, T. W., 1987

*Experimental studies on the propagation and establishment of reeds (phragmites australis) for root zone treatment of sewage*

51 pages

## 9. SUIVI ET EXPLOITATION

### 9.1 Exploitation

Ces types de système de traitement nécessitent des interventions simples et de courtes durées. Les principales sont:

- ajustement, au besoin, de la séquence d'ouverture et de fermeture des vannes de répartition des eaux usées aux unités à écoulement vertical;
- vérification mensuelle du niveau des boues dans les fosses septiques;
- vidange, au besoin, des boues de fosses septiques;
- vérification mensuelle du niveau des piézomètres dans les unités HSS;
- ajustement, au besoin, des vannes de contrôle de niveau des unités HSS.

Ces activités peuvent être réalisées dans le cadre d'une visite régulière du système. L'opérateur pourra réaliser en même temps une vérification générale des ouvrages. Une visite générale effectuée 2 à 3 fois par semaine est suffisante. Des visites plus fréquentes doivent être effectuées après des pluies importantes et durant la fonte de neige.

Les équipements mécaniques sont réduits au minimum et comptent des flottes de contrôle de niveau, quelques vannes électriques, des contrôles à minuterie et quelques pompes. L'entretien et la réparation de ces équipements sont peu fréquents et peu coûteux.

Il peut être nécessaire de réaliser un certain entretien des plantes des unités de traitement durant la première année de croissance pour favoriser la couverture générale du système et éviter la présence de mauvaises herbes (voir chapitre 8). Par la suite, les roseaux (*Phragmites australis*) peuvent maintenir leur couverture monospécifique assez facilement. L'enlèvement des boues minéralisées et des tiges mortes sera réalisé une fois à tous les vingt ans. Ces dernières pourront être utilisées comme engrais ou compostées avant leur réutilisation.

### 9.2 Suivi de base suggéré des équipements de traitement

#### 9.2.1 Grands principes

L'élaboration du programme de suivi de base fut réalisée à l'aide des recommandations pour le suivi de station d'épuration du type fosse septique et de celles pour le suivi de station d'épuration du type étang aéré publiées par le ministère de l'Environnement du Québec en 1987, incluant les révisions jusqu'en 1992. Ce programme fut adapté au contexte des marais artificiels.

L'échantillonnage à l'effluent du système sera réalisé à deux reprises par an, soit une fois en hiver et l'autre en été. Des échantillonnages

de l'affluent, composés sur 24 heures et réalisés sur une période de trois jours, seront effectués en janvier et en juillet.

Dans l'ensemble, les procédures et les fiches de travail suggérées dans les documents du ministère de l'Environnement du Québec peuvent être utilisées pour la réalisation des rapports de suivi.

### 9.2.2 Description des activités

Les activités comprendront des campagnes de mesures de débits, une série d'observations générales ainsi que des campagnes d'échantillonnage instantané et composé. Les différents paramètres analysés ainsi que la fréquence des relevés sont présentés dans les pages qui suivent.

<u>Paramètres analysés</u>	<u>Fréquence des relevés</u> <sup>(2)</sup>
<b>A. Débits</b>	
— Affluent, débit journalier (m <sup>3</sup> /d) compilé en continu et totalisé	1/d
— Effluent, débit instantané (m <sup>3</sup> /d)	1/s
<b>B. Trop-pleins</b>	
— Durée de fonctionnement (heures/d)	1/d
— Nombre d'événements (nombre/d)	1/d
<b>C. Météorologie</b>	
— Précipitation liquide (mm d'eau/d)	1/d
<b>D. Traitement</b>	
— O.D. dans l'effluent (mg/l)	1/m
— Température de l'effluent (°C)	1/m
— O.D. à la sortie de chaque étage (mg/l)	1/m
— Température à la sortie de chaque étage (°C)	1/m
— Présence d'odeurs	1/m
— Débris flottants	1/m
— Dérivation des unités	1/m
— Potentiel d'oxydoréduction	1/m
— Examen visuel pour détecter l'écoulement de surface, les plantes parasitées ainsi	

(2) 1/d = une fois par jour  
 1/s = une fois par semaine  
 1/m = une fois par mois  
 1/3 m = une fois par 3 mois

1/2s = une fois par 2 semaines

que les plantes poussant en périphérie du système

1/3 m

### E. Effluent (contrôle régulier)

Paramètres		Du 01-09 au 31-05 (3)	Du 01-06 au 01-09 (3)
DBO <sub>5</sub>	(mg/l)	1/3 m	1/m
DCO	(mg/l)	1/3 m	1/m
MES	(mg/l)	1/3 m	1/m
NH <sub>4</sub>	(mg/l N)	1/3 m	1/m
NO <sub>2</sub> -NO <sub>3</sub>		1/3 m	1/m
P <sub>tot</sub>	(mg/l P) (1)	1/3 m	1/m
Coliformes fécaux	(nb/100 ml) (1)	1/3 m	1/m

(1): P<sub>tot</sub> et coliformes fécaux sont requis seulement pour les projets où une exigence sur ces paramètres est spécifiée.

### F. Affluent (contrôle périodique)

Paramètres	Période
DBO <sub>5</sub> (mg/l)	2 fois/an, soit 3 jours consécutifs  En hiver (janvier ou février) En été (entre le 15-06 et le 15-08)
DCO (mg/l)	
MES (mg/l)	
NTK	
NH <sub>4</sub> (mg/l N)	
P <sub>tot</sub> (mg/l P) (1)	

(1): P<sub>tot</sub> est requis seulement pour les projets où une exigence est spécifiée.

### G. Boues et écumes des fosses septiques

- Épaisseur d'écumes dans la fosse (cm)  
(dans le premier compartiment) 1/3 m
- Épaisseur de boues dans la fosse (cm)  
(dans la partie située en aval du premier compartiment) 1/3 m

### H. Boues de fosses septiques vidangées

- Volume vidangé (m<sup>3</sup>) À chaque vidange de la fosse
- Destination des boues
- Nom du transporteur
- Numéro de permis

(3) Sauf lors des contrôles périodique

- Une vidange de la fosse sera effectuée au moins une fois par an (ou plus fréquemment, si nécessaire)

### I. Humus et boues accumulés sur les marais

- Épaisseur accumulée (incluant la partie végétative) dans chaque unité 1/an
- Prélèvements et analyses de boues avant évacuation (prévus 1 fois/20 ans) et analyses suivantes (devrait comprendre une étude pour établir le meilleur mode d'évacuation (valorisation, enfouissement, autres): 1/20 ans

MT	(mg/l)	Aluminium	(mg/kg de MS)
MVT	(mg/l)	Arsenic	(mg/kg de MS)
NTK	(mg/kg de MS)	Bore	(mg/kg de MS)
NH <sub>4</sub>	(mg/kg de MS)	Cadmium	(mg/kg de MS)
NO <sub>2</sub> -NO <sub>3</sub>	(mg/kg de MS)	Calcium	(mg/kg de MS)
K	(mg/kg de MS)	Cobalt	(mg/kg de MS)
P <sub>tot</sub>	(mg/kg de MS)	Chrome	(mg/kg de MS)
pH		Cuivre	(mg/kg de MS)
		Mercure	(mg/kg de MS)
		Manganèse	(mg/kg de MS)
		Magnésium	(mg/kg de MS)
		Molybdène	(mg/kg de MS)
		Nickel	(mg/kg de MS)
		Plomb	(mg/kg de MS)
		Sélénium	(mg/kg de MS)
		Zinc	(mg/kg de MS)
		BPC	(mg/kg de MS)

### J. Vérification des périmètres d'implantation des marais

L'opérateur doit vérifier régulièrement la présence de stolons ou de pousses de roseaux à l'extérieur des marais et les détruire.

### 9.2.3 Précisions sur la localisation des points de mesures de débits et d'échantillonnage ainsi que sur les méthodes utilisées

#### A. Mesures de débits à l'affluent

Le débit à l'entrée des systèmes avec unités verticales sera mesuré dans le répartiteur. Celui-ci est équipé de flottes et il suffit d'y installer un volumètre avec enregistreur sur charte.

Dans les systèmes comportant seulement des unités HSS, un volumètre sera installé dans le poste de pompage situé en amont. S'il n'y en a pas, une chambre de mesures avec canal

Parshall pourrait être installée en amont ou en aval de la fosse septique.

#### **B. Mesures de débits à l'effluent**

Un déversoir en V, installé à la sortie du système, permettra de réaliser des lectures instantanées de niveau d'eau qui pourront être transposées en débit. Compte tenu que la variation du débit à la sortie du système est plus lente, ces lectures seront adéquates pour obtenir une vue d'ensemble du rendement du système.

#### **C. Trop-pleins**

Les trop-pleins du poste de pompage, des répartiteurs et des marais verticaux seront équipés de systèmes permettant de mesurer le nombre et la durée des débordements. Ces trop-pleins opéreront seulement en cas de mal fonctionnement de l'une ou l'autre des unités.

#### **D. Météorologie**

Un pluviomètre devra être installé près du système de traitement, afin d'établir les quantités de pluie journalière.

#### **E. Traitement**

Les mesures de la température et de l'oxygène dissous ainsi que les observations générales seront effectuées sur chacune des unités de traitement selon la fréquence établie au chapitre précédent et compilées sur des fiches de terrain conçues spécialement à cette fin.

#### **F. Effluent à contrôle régulier**

Un échantillon instantané sera prélevé à l'effluent pour le contrôle régulier selon les critères d'échantillonnage établis par un laboratoire et les analyses seront effectuées par ce même laboratoire qui sera accrédité par le ministère de l'Environnement du Québec.

#### **G. Affluent à contrôle périodique**

Le contrôle périodique sera réalisé à l'affluent sur trois échantillons composés sur 24 heures et prélevés sur une période de trois jours consécutifs. Celui-ci devra être effectué à l'aide d'un échantillonneur proportionnellement dans le temps qui prélèvera des échantillons au moins quatre fois à l'heure. Ces échantillons seront analysés par un laboratoire accrédité par le ministère de l'Environnement du Québec.

#### **H. Effluent à contrôle périodique**

Cet échantillonnage sera effectué de la même façon que pour l'effluent à contrôle régulier.

#### **I. Boues et écumes des fosses septiques**

Les mesures de boues dans les fosses septiques seront effectuées dans le premier compartiment.

#### **J. Boues de fosses septiques vidangées**

Des statistiques seront compilées afin de connaître le volume et la destination des boues à chacune des vidanges des fosses septiques.

#### **K. Boues accumulées sur les marais**

Des mesures du rehaussement de la surface des marais verticaux et horizontaux seront effectuées annuellement. Elles permettront d'établir le degré d'accumulation des boues incluant la partie provenant des végétaux en place. Ces mesures seront effectuées dans chacune des unités des systèmes pour chaque portion de 25 m<sup>2</sup> de superficie.

Aucun enlèvement des boues n'est prévu pour les vingt premières années.

## 10. ANALYSE ÉCONOMIQUE

### 10.1 Généralités

Ce chapitre vise à établir les coûts d'immobilisation et d'exploitation des systèmes de traitement par marais artificiels. Bien entendu, le coût des systèmes peut être très variable dépendant des conditions spécifiques de terrain, mais les estimations sont basées sur des conditions moyennes.

Les estimations sont réalisées à partir des hypothèses suivantes:

- terrain relativement plat ou en pente légère, non boisé;
- aucune présence de roc (jusqu'à environ 2,5 m sous la surface);
- l'émissaire n'est pas inclus;
- le sol en place est utilisable pour la construction des digues des marais;
- le matériel d'emprunt pour construire la membrane imperméable ou les médias filtrants est disponible à moins de 30 km du site.

Les coûts des marais artificiels pour différentes conditions sont présentés à l'annexe IX. Les prix unitaires ayant servi à cette estimation y sont détaillés.

Les systèmes de traitement ont été conçus à partir des données de bases suivantes:

- $Q_{eu}$  = 320 l/pers.·d
- $DBO_5$  = 0,054 kg/pers.·d
- MES = 0,06 kg/pers.·d
- $P_{total}$  = 0,002 kg/pers.·d
- $N_{total}$  = 0,006 kg/pers.·d

Pour fins de comparaison, l'estimation d'un des systèmes fut reprise en supposant un débit d'eaux usées de 250 l/pers.·d au lieu de 320 l/pers.·d, car ces conditions sont fréquemment rencontrées dans des petites municipalités lorsque les édifices publics et de services sont peu nombreux et le réseau assez étanche (voir article 10.4).

Le tableau 10.1 présente les cas retenus pour l'étude. Les estimations furent réalisées pour des municipalités dont la population est de 100, 400 ou 800 personnes. Le taux de dilution des eaux usées peut avoir un impact non négligeable sur le dimensionnement des ouvrages. Trois types de réseau sont comparés, soit un réseau de bonne qualité et relativement étanche, un réseau de qualité moyenne et un réseau de mauvaise qualité.

TABLEAU 10.1

**CAS TYPQUES RETENUS POUR L'ÉTUDE COMPARATIVE DES COÛTS  
DE MARAIS ARTIFICIELS ET DES ÉTANGS AÉRÉS**

NUMÉRO DE CAS	OBJECTIFS DE REJETS DBO5 (mg/l)		TYPE DE MATÉRIAU EN PLACE	QUALITÉ DU RÉSEAU D'ÉGOUT	POPULATION	NUMÉRO DE CAS	OBJECTIFS DE REJETS DBO5 (mg/l)		TYPE DE MATÉRIAU EN PLACE	QUALITÉ DU RÉSEAU D'ÉGOUT	POPULATION
	Été	Hiver					Été	Hiver			
1	20	25	Argile	Bonne	100	19	25	30	Argile	Bonne	100
2	"	"	"	"	400	20	"	"	"	"	400
3	"	"	"	"	800	21	"	"	"	"	800
4	"	"	"	Moyenne	100	22	"	"	"	Moyenne	100
5	"	"	"	"	400	23	"	"	"	"	400
6	"	"	"	"	800	24	"	"	"	"	800
7	"	"	"	Faible	100	25	"	"	"	Faible	100
8	"	"	"	"	400	26	"	"	"	"	400
9	"	"	"	"	800	27	"	"	"	"	800
10	"	"	Granulaire	Bonne	100	28	"	"	Granulaire	Bonne	100
11	"	"	"	"	400	29	"	"	"	"	400
12	"	"	"	"	800	30	"	"	"	"	800
13	"	"	"	Moyenne	100	31	"	"	"	Moyenne	100
14	"	"	"	"	400	32	"	"	"	"	400
15, 15A, 15B, 15C	"	"	"	"	800	33, 33A, 33B, 33C	"	"	"	"	800
16	"	"	"	Faible	100	34	"	"	"	Faible	100
17	"	"	"	"	400	35	"	"	"	"	400
18	"	"	"	"	800	36	"	"	"	"	800

Pour les fins d'analyse, nous avons établi le débit d'infiltration à nappe haute au double du débit d'infiltration à nappe basse. La conception est réalisée à partir d'un débit d'infiltration à nappe haute pour la période estivale et à nappe basse pour la période hivernale. Le bon réseau a un débit d'infiltration à nappe haute de la moitié du débit d'eaux usées et du quart du débit d'eaux usées à nappe basse. Le réseau moyen présente une infiltration égale au débit d'eaux usées à nappe haute et la moitié du débit d'eaux usées à nappe basse. Finalement, le réseau de mauvaise qualité a un débit d'infiltration du double du débit d'eaux usées à nappe haute et égal au débit d'eaux usées à nappe basse.

L'autre variable utilisée fait intervenir différents objectifs de rejet. Deux options furent retenues, soit l'enlèvement moyen généralement demandé par le ministère de l'Environnement du Québec, soit des concentrations de 20 mg/l de DBO<sub>5</sub> à l'effluent en été et de 25 mg/l en hiver, et des conditions d'enlèvement minimum avec des concentrations en été de 25 mg/l et en hiver de 30 mg/l. Finalement, les besoins de membrane imperméable ont un impact non négligeable sur le coût des structures. Un premier bloc a été estimé en émettant l'hypothèse que l'imperméabilisation n'est pas nécessaire, compte tenu de l'argile en place et un second bloc fut estimé en supposant la construction de membrane d'argile.

## **10.2 Établissement des coûts d'immobilisation et d'exploitation des marais artificiels**

Les trente-six cas retenus se décomposent en dix-huit systèmes nécessitant une membrane imperméable et dix-huit autres sans membrane imperméable. Ces dix-huit cas sont répartis en neuf dont les objectifs de rejet sont élevés et neuf autres dont les objectifs sont faibles. Chaque groupe de neuf comprend trois dimensions de municipalités ayant chacune trois types de réseau. On compte donc effectivement neuf cas dont les caractéristiques des affluents diffèrent et ceux-ci sont présentés au tableau 10.2.

On y retrouve, de plus, les concentrations d'été et d'hiver à l'entrée du système de traitement. Celles-ci permettent, entre autres, d'établir le type de marais retenu. En effet, si l'une des concentrations à l'entrée est plus élevée que 100 mg/l, l'estimation est réalisée pour un système composé d'une fosse septique, d'un étage avec unités verticales et d'un dernier étage de type HSS. Si les concentrations sont inférieures à 100 mg/l, le système à marais artificiels comprend une fosse septique et un étage de type HSS<sup>(4)</sup>.

Les dimensions des principales composantes du système de traitement sont présentées au tableau 10.3. On retrouve toujours deux cas dont les dimensions sont les mêmes car seul le type d'imperméabilisation change.

La synthèse des coûts d'immobilisation et d'exploitation des marais artificiels est présentée au tableau 10.4. Les superficies nécessaires pour la

(4) Nous avons établi, ultérieurement à la réalisation de ces estimations, la sélection du type de procédé en fonction des caractéristiques des eaux usées à la sortie de la fosse septique. Lors de ces estimations, le partage s'établit à partir des caractéristiques des eaux usées brutes. Bien que cette différence puisse avoir un impact sur les coûts, l'objectif de fournir un ordre de grandeur des coûts impliqués est tout de même atteint.

TABLEAU 10.2

**CARACTÉRISTIQUES DES EAUX USÉES RETENUES POUR L'ÉTUDE COMPARATIVE  
DES COÛTS DE MARAIS ARTIFICIELS ET DES ÉTANGS AÉRÉS**

QUALITÉ DU RÉSEAU D'ÉGOUT	NUMÉRO DE CAS	POPULATION	CHARGES (kg/d)				DÉBIT (m <sup>3</sup> /d) (été)			CONCENTRATION À L'ENTRÉE DBO <sub>5</sub> (mg/l) (été)	DÉBIT (m <sup>3</sup> /d) (hiver)			CONCENTRATION À L'ENTRÉE DBO <sub>5</sub> (mg/l) (hiver)
			DBO <sub>5</sub>	MES	PI	NH <sub>4</sub> -N	Q Infiltration	Eaux usées	Total		Q Infiltration	Eaux usées	Total	
BONNE	1, 10, 19, 28	100	5,4	6,0	0,2	0,6	16	32	48	112,5	8	32	40	135,0
	2, 11, 20, 29	400	21,6	24,0	0,8	2,4	64	128	192	112,5	32	128	160	135,0
	3, 12, 21, 30	800	43,2	48,0	1,6	4,8	128	256	384	112,5	64	246	320	135,0
MOYENNE	4, 13, 22, 31	100	5,4	6,0	0,2	0,6	32	32	64	84,4	16	32	48	112,5
	5, 14, 23, 32	400	21,6	24,0	0,8	2,4	128	128	256	84,4	64	128	192	112,5
	6, 15, 15A, 15B, 24, 33, 33A, 33B	800	43,2	48,0	1,6	4,8	256	256	512	84,4	128	256	384	112,5
	15C, 33C	800	43,2	48,0	1,6	4,8	200	200	400	108	100	200	300	144
FAIBLE	7, 16, 25, 34	100	5,4	6,0	0,2	0,6	64	32	96	56,2	32	32	64	84,4
	8, 17, 26, 35	400	21,6	24,0	0,8	2,4	256	128	384	56,2	128	128	256	84,4
	9, 18, 27, 36	800	43,2	48,0	1,6	4,8	512	256	768	56,2	256	256	512	84,4

TABLEAU 10.3

**CARACTÉRISTIQUES DES UNITÉS FORMANT LES MARAIS ARTIFICIELS  
POUR LES 36 CAS À L'ÉTUDE**

NUMÉRO DE CAS	VOLUME FOSSE SEPTIQUE (m3)	VOLUME RÉPARTITEUR (m3)	SUPERFICIE D'UNE UNITÉ VERTICALE (m2)	UNITÉ HSS		
				Longueur (m)	Largeur (m)	Superficie (m2)
1 et 10	48	6	60	3,19	173,87	555
2 et 11	192	24	240	3,19	695,46	2 220
3 et 12	384	48	480	3,19	1 390,92	4 440
4 et 13	64	8	80	3,00	183,52	551
5 et 14	256	32	320	3,00	734,09	2 202
6 et 15	512	64	640	3,00	1 468,18	4 405
7 et 16	96	—	—	3,00	173,84	522
8 et 17	384	—	—	3,00	695,35	2 085
9 et 18	768	—	—	3,00	1 390,68	4 172
19 et 28	48	6	60	3,00	152,94	459
20 et 29	192	24	240	3,00	611,74	1 835
21 et 30	384	48	480	3,00	1 223,49	3 670
22 et 31	64	8	80	3,00	146,63	440
23 et 32	256	32	320	3,00	586,52	1 760
24 et 33	512	64	640	3,00	1 233,69	3 701
25 et 34	96	—	—	3,00	124,84	375
26 et 35	384	—	—	3,00	499,35	1 498
27 et 36	768	—	—	3,00	998,69	2 996

**TABLEAU 10.4**  
**SYNTHÈSE DES COÛTS DES SYSTÈMES DE TRAITEMENT**

NUMÉRO DE CAS	SUPERFICIE (1)  (m2)	COÛTS D'IMMOBILISATION  Marais artificiels (000 \$)	COÛTS D'EXPLOITATION		COÛTS TOTAUX  Marais artificiels (000 \$)
			Marais artificiels (\$/an)	actualisés (000 \$)	
1	2 100	236	6 800	92	328
2	6 300	419	9 700	132	551
3	11 700	698	12 500	170	868
4	2 300	248	6 800	92	340
5	6 900	460	9 700	132	592
6	12 700	789	12 500	170	959
7	1 400	170	5 800	79	249
8	4 500	309	8 700	118	427
9	8 500	512	11 500	156	668
10	2 100	246	6 800	92	338
11	6 300	452	9 700	132	584
12	11 700	757	12 500	170	927
13	2 300	260	6 800	92	352
14	6 900	496	9 700	132	628
15	12 700	853	12 500	170	1 023
16	1 400	174	5 800	79	253
17	4 500	326	8 700	118	444
18	8 500	545	11 500	156	701

(1) Superficie: Superficie de terrain requise pour la construction de la station d'épuration.

**TABLEAU 10.4**  
**SYNTHÈSE DES COÛTS DES SYSTÈMES DE TRAITEMENT(suite)**

NUMÉRO DE CAS	SUPERFICIE (1)	COÛTS D'IMMOBILISATION Marais artificiels (000 \$)	COÛTS D'EXPLOITATION		COÛTS TOTAUX Marais artificiels (000 \$)
	(m2)		Marais artificiels		
			(\$/an)	actualisés (000 \$)	
19	1 900	233	6 800	92	325
20	5 700	405	9 700	132	537
21	10 500	667	12 500	170	837
22	2 100	243	6 800	92	335
23	6 000	441	9 700	132	573
24	11 200	753	12 500	170	923
25	1 100	164	5 800	79	243
26	3 400	282	8 700	118	400
27	6 300	453	11 500	156	609
28	1 900	243	6 800	92	335
29	5 700	434	9 700	132	566
30	10 500	721	12 500	170	891
31	2 100	254	6 800	92	346
32	6 000	472	9 700	132	604
33	11 200	812	12 500	170	982
34	1 100	167	5 800	79	246
35	3 400	294	8 700	118	412
36	6 300	476	11 500	156	632

(1) Superficie: Superficie de terrain requise pour la construction de la station d'épuration.

constitution des marais artificiels sont en général moindres que celles pour les étangs aérés lorsque la population est faible, elles sont identiques pour des populations d'environ 400 personnes et légèrement supérieures pour des populations de 800 personnes.

Normalement, la dilution augmente la superficie nécessaire de systèmes semblables. Par exemple, le cas 3 nécessite une superficie de 11 700 m<sup>2</sup> tandis que le cas 6, dont les eaux usées sont plus diluées, nécessite une superficie de 12 700 m<sup>2</sup>. Par contre, le cas 9, qui est encore plus dilué, nécessite seulement une superficie de 8 500 m<sup>2</sup>. Cette diminution est due aux critères de sélection des types de marais. En effet, la concentration en eaux usées à l'affluent du système 9 est inférieure à 100 mg/l de DBO<sub>5</sub> et celui-ci fut donc conçu seulement avec une unité horizontale tandis que les systèmes 3 et 6 furent conçus avec une unité verticale en amont qui augmente les superficies nécessaires et les coûts.

La main-d'oeuvre pour l'exploitation et le suivi des marais varie de 225 à 490 heures par an selon la dimension du système. La production de boues de fosses septiques fut établie à 38 l/pers.·an et à un coût de disposition de 25 \$/m<sup>3</sup>.

Les coûts d'exploitation des marais varient de 5 800 \$ à 12 500 \$, ce qui représente des montants actualisés sur vingt ans à 4% (facteur de 13,59) de 79 000 \$ à 170 000 \$. Dans l'ensemble, l'exploitation des marais est d'environ 50% moins chère que celle des étangs aérés et représente des économies actualisées de l'ordre de 150 000 \$. Cette différence est due, dans une large mesure, aux coûts de consommation énergétiques des étangs aérés et, dans une moindre mesure, aux frais de renouvellement et d'entretien mécanique sans compter les besoins de personnel spécialisé souvent peu disponible dans les petites municipalités.

Les petits systèmes par marais sont beaucoup moins dispendieux que les systèmes conventionnels avec étangs aérés tandis que la différence de coût des systèmes pour 800 personnes est faible.

### **10.3 Comparaison des coûts d'un système avec ou sans unités verticales**

Tel que discuté précédemment, la présence d'unités verticales favorise un meilleur traitement et augmente le potentiel d'enlèvement de la DBO<sub>5</sub>, du phosphore et de l'azote. Par contre, les procédés munis de cet équipement seront plus dispendieux. Afin d'avoir une vision des coûts supplémentaires que cela représente, une conception et des estimations furent réalisés pour les cas 15 et 33 qui représentent en fait le même équipement, à la seule différence des critères de rejet. Les cas 15 et 33 comprennent une fosse septique suivie d'un étage avec unités verticales et d'un dernier étage de type HSS. Les systèmes 15A et 33A comprennent une fosse septique avec un étage HSS.

Certains auteurs ne considèrent pas utile l'usage d'une fosse septique en amont des marais. Bien que cette solution nous semble douteuse et qu'elle puisse occasionner des problèmes de salubrité et de colmatage, nous avons

vérifié les coûts comparatifs d'un tel système. Tel que discuté précédemment, on doit vérifier si les fosses septiques situées en amont des unités verticales sont requises. Si celles-ci s'avéraient non essentielles, nous avons établi, pour les cas 15B et 33B, les coûts d'un système composé d'un premier étage avec unités verticales et d'un second, de type HSS, sans fosse septique. Le tableau 10.5 présente le dimensionnement des principaux éléments de procédé.

Le tableau 10.6 compare les coûts de ces différentes variantes. Le système le moins dispendieux est celui composé de la fosse septique suivie d'un étage à écoulement horizontal sous la surface. Par la suite, celui composé d'un étage vertical suivi d'un étage horizontal sous la surface est plus dispendieux et nécessite la plus grande superficie. Dernièrement, le système composé d'une fosse septique précédant un étage vertical suivi d'un étage horizontal sous la surface est encore plus dispendieux mais la superficie nécessaire est moins grande. Par rapport au système avec fosse septique et étage HSS, celui avec étage vertical et étage HSS coûte environ 20% plus cher pour une augmentation de superficie d'environ 22%. Le système avec fosse septique suivie d'un étage vertical et d'un étage HSS représente une dépense de 35% de plus pour une augmentation de superficie nécessaire de 5%. Plusieurs autres facteurs doivent être analysés avant de choisir la composition du système de traitement. De plus, le suivi des premières installations implantées au Québec permettra de fournir un éclairage nouveau et de faciliter les choix.

#### **10.4 Économies potentielles d'un système conçu avec 250 l/pers.·d ou bien de 320 l/pers.·d**

Les cas 15 et 33, qui furent conçus tous deux pour des populations de 800 personnes avec un réseau d'égout de qualité moyenne et des besoins d'imperméabilisation, furent retenus pour établir l'impact d'une diminution du débit d'eaux usées de 320 l/pers.·d à 250 l/pers.·d. Le système 15 est conçu pour des objectifs de rejet sévères tandis que le système 33 est conçu pour des objectifs de rejet moyens. Les cas 15C et 33C, présentés aux tableaux 10.2, 10.5 et 10.6, permettent de constater une économie d'environ 15% sur les coûts d'immobilisation par rapport à une conception à partir d'un débit d'eaux usées de 320 l/pers.·d.

TABLEAU 10.5

**COMPARAISON DES DIFFÉRENTS AGENCEMENTS POSSIBLES  
DE MARAIS ARTIFICIELS POUR UN CAS TYPIQUE**

NUMÉRO DE CAS	VOLUME FOSSE SEPTIQUE (m3)	VOLUME RÉPARTITEUR (m3)	SUPERFICIE D'UNE UNITÉ VERTICALE (m2)	UNITÉ HSS			CARACTÉRISTIQUES
				Longueur (m)	Largeur (m)	Superficie (m2)	
15	512	64	640	3,00	1 468,18	4 405	FS+UV+HSS
15A	512	—	—	3,56	1 859,12	6 610	FS+HSS
15B	—	64	640	3,25	1 701,51	5 537	UV+HSS
15C	400	50	500	3,29	1 344,29	4 424	FS+UV+HSS (1)
33	512	64	640	3,00	1 233,69	3 701	FS+UV+HSS
33A	512	—	—	3,29	1 721,74	5 669	FS+HSS
33B	—	64	640	3,00	1 534,19	4 603	UV+HSS
33C	400	50	500	3,01	1 227,54	3 689	FS+UV+HSS (1)

(1): En considérant que le débit unitaire est de 250 l/pers.·d.

TABLEAU 10.6

**COMPARAISON DES COÛTS DE DIFFÉRENTS AGENCEMENTS POSSIBLES  
DE MARAIS ARTIFICIELS POUR UN CAS TYPIQUE**

NUMÉRO DE CAS	DESCRIPTION	COÛTS D'IMMOBILISATION	COÛTS D'EXPLOITATION		COÛTS TOTAUX
		Marais artificiels (000 \$)	Marais artificiels (\$/an)	actualisés (000 \$)	Marais artificiels (000 \$)
15	FS+UV+HSS	853	12 500	170	1 023
15A	FS + HSS	609	11 500	156	765
15B	UV + HSS	769	11 000	149	918
15C	FS+UV+HSS (1)	760	12 500	170	930
33	FS+UV+HSS	812	12 500	170	982
33A	FS + HSS	570	11 500	156	726
33B	UV + HSS	725	11 000	149	874
33C	FS+UV+HSS (1)	728	12 500	170	898

(1): En considérant que le débit unitaire d'eaux usées est de 250 l/pers.-d.

## 11. DISCUSSIONS ET RECOMMANDATIONS

Les procédés de traitement d'eaux usées par marais artificiels offrent des avenues intéressantes pour les petites municipalités du Québec. Bien que quelques systèmes expérimentaux doivent être suivis avant d'établir une politique et de fixer des critères de conception définitifs, les résultats obtenus lors de cette étude permettent de croire que ce type de procédé est applicable au Québec. Compte tenu principalement des températures froides et de la forte dilution des eaux usées québécoises, les critères de construction et de conception nécessiteront une certaine adaptation.

Les procédés sélectionnés dans le cadre de cette étude offrent, selon nous, les meilleures chances de succès. Cela ne signifie pas que les autres variantes de traitement par marais ne sont pas applicables au Québec bien que, suite à cette analyse, elles soient apparues moins intéressantes. Le procédé offrant le meilleur potentiel est composé d'une fosse septique suivie d'un premier étage composé de quatre unités verticales opérant en parallèle et terminé par une unité à écoulement horizontal sous la surface. Si la concentration en DBO<sub>5</sub> à l'affluent est inférieure à 100 mg/l, l'étage vertical peut être éliminé.

Le traitement d'eaux usées par marais artificiels offre de bons rendements pour l'enlèvement de la DBO et des matières en suspension. Il est possible d'obtenir à l'effluent un dénombrement de coliformes fécaux inférieur à 10 000 nb/100 ml assez facilement mais il est difficile de garantir en tout temps des concentrations inférieures à 1 000 nb/100 ml. Des études plus approfondies pourraient permettre d'optimiser la capacité de ces systèmes à désinfecter les eaux usées. Une bonne exploitation d'un système hybride avec étage vertical et étage horizontal sous la surface peut assurer un enlèvement de l'azote par nitrification-dénitrification. Finalement, bien que la déphosphatation soit envisageable, des études expérimentales seraient nécessaires afin de définir le système idéal permettant d'optimiser la déphosphatation et d'établir la procédure de sélection optimale des matériaux filtrants.

**12. BIBLIOGRAPHIE****AGALEDES, P., 1975**

*Cours d'hydrologie, janvier 1975*  
École Polytechnique de Montréal, 266 pages

**AILSTOCK, M. S., 1990**

*Utilization and Treatment of Thermal Discharge by the Establishment of a Wetlands Plant Nursery*  
Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 719-726 pages

**ALLEN, H. H., G. J. PIERCE, ET R. VAN WORMER, 1990**

*Considerations and Techniques for Vegetation Establishment in Constructed Wetlands*  
Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 405-416 pages

**AMERICAN SOCIETY AGRICULTURAL ENGINEERS, 1991**

*On site Wastewater Treatment*  
American Society of Agricultural Engineers, Compte rendu de conférences du "Sixth National Symposium on Individual and Small Community sewage systems, 375 pages

**ANDERSON, DAMAN L., ROBERT L. SIEGRIST ET RICHARD J. OTIS, 1985**

*Technology assessment of intermittent sand filters*  
Merl, U.S.E.P.A., 55 pages

**ARMSTRONG, J. ET ALL., 1988 a**

*Phragmites australis: A critical appraisal of the ventilating pressure concept and on analysis of resistance to pressurized gaz flow and gaseous diffusion in horizontal rhizomes*  
Article de revue "New Phytol" No 100, 383-389 pages

**ARMSTRONG, J. ET W. ARMSTRONG, 1990 b**

*Pathways and mechanisms of oxygen transport in Phragmites australis*  
Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 529-534 pages

**ARMSTRONG, J. ET W. ARMSTRONG, 1990 a**

*Light-enhanced connective throughflow increases oxygenation in rhizomes and rhizospheres of phragmites australis (Cav.) Trin. ex. Steud.*  
Article de revue "New Phytol" No 114, 121-128 pages

**ARMSTRONG, J. ET W. ARMSTRONG, 1988 b**

*Phragmites australis - A preliminary study of soil-oxidizing sites and inkernal gas transport pathways*  
Article de revue "New Phytol" No 108, 373-382 pages

**ARMSTRONG, W., J. ARMSTRONG ET P.M. BECKETT, 1990**

*Measurement and modelling of oxygen release from roots of Phragmites australis*  
Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp.41-52 pages

**ARTHUR, R. A. J., 1986**

*At the root of the matter-A profile of the Kickuth root zone system*  
Article de revue "Water and Waste Treatment", vol. 29, no. 3, 34-35 & 48 pages

**ASMUS, UDO ET R. VABA, 1991**

*The ecological development of Pärnu sewerage and treatment system*  
Éds. C. Etnier & B. Guterstam, Compte rendu de conférences: Ecological Engineering for wastewater treatment, pp. 312-314 pages

**AUGER, RAYMOND ET J. R. COTE, 1991**

*Assainissement des eaux usées dans certaines agglomérations européennes*  
SQAE, MENVIQ - Rapport de visite, 56 pages

- AUTEUR INCONNU, 1991 b**  
*Constructed wetlands for water quality Improvement an International conference*  
 The wetlands laboratory and the university of west Florida, 91 pages
- AUTEUR INCONNU, 1991 a**  
*Wetlands sewage treatment tested in the north*  
 Water and Pollution control - October 1991, pp. 9-10 pages
- AUTEUR INCONNU, 1990 e**  
*L'eau de roseaux*  
 Article de revue: "Actualité" 1er décembre 1990, 9-10 pages
- AUTEUR INCONNU, 1990 d**  
*New danish plants show the way for sludge handling*  
 Article de revue W.P.I., vol. 4, 32-35 pages
- AUTEUR INCONNU, 1990 c**  
*Väder och Vatten*
- AUTEUR INCONNU, 1990 b**  
*Harwich Greenhouse-Up and running*  
 Article de revue: the ecological engineer, no. 2, 3 pages
- AUTEUR INCONNU, 1990 a**  
*Données météorologiques de la Finlande*  
 13 pages
- AUTEUR INCONNU, 1989**  
*Les joncs et les roseaux (comme plantes pour le traitement des eaux usées)*  
 6 pages
- AUTEUR INCONNU, 1976**  
*Punaises des Phragmites: du marais asséché au champ de blé voisin*  
 Journal Phytoma - Défense des cultures, p. 27 pages
- AUTEUR INCONNU, 1971**  
*Research into the biology of the common reed (Phragmites Communis Trin.) in the U.S.S.R.*  
 Folia geobot, phytotax, praha 6, pp. 221-230 pages
- AUTEUR INCONNU, -**  
*Importance des feux de Phragmites*  
 Hydro-Québec, service appareillage, pp. 16-39-41 pages
- BAHLO, K. E. ET F. G. WACH, 1990**  
*Purification of domestic sewage with and without faeces by vertical intermittent filtration in reed and rush beds*  
 Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 215-222 pages
- BASTIAN, R. K., P. E. SHANAGHAN ET B. P. THOMPSON, 1990**  
*Use of Wetlands for Municipal Wastewater Treatment and Disposal — Regulatory Issues and EPA Policies*  
 Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 265-278 pages
- BATAL, W., L. S. LAUDON, T. R. WILDEMAN ET N. MOHDNOORDIN, 1990**  
*Bacteriological Tests from the Constructed Wetland of the Big Five Tunnel, Idaho Springs, Colorado*  
 Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 550-557 pages
- BATCHELOR, A., W. E. SCOTT ET A. WOOD, 1990**  
*Constructed wetland research programme in South Africa*  
 Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 373-382 pages

**BAVOR, H. J., D. J. ROSER, P. J. FISHER ET I. C. SMALLS, 1990***Performance of Solid-Matrix Wetland Systems, Viewed as Fixed-Film Bioreactors*

Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 646-656 pages

**BELANGER, G. ET GERARDO BUELNA, 1990***Biofiltration à base de tourbe pour le traitement des eaux usées de petites municipalités*

Article de revue "Sciences et techniques de l'eau" août 1990

**BELICEK J., J. F. J. ZOAL ET R. L. KENT, -***A recirculating intermittent sand filter system for on-site wastewater treatment*

Alberta District Office, Conservation and Protection, Environmental Protection, Environment Canada

**BENDIXEN, THOMAS W., R. D. HILL, W. A. SCHWARTZ ET GOLDEN G. ROBECK, 1968***Ridge and furrow liquid waste disposal in a northern latitude*

ASCE, Journal of the Sanitary Engineering Division proceedings of the American Society of Civil Engineers, pp. 147-157 pages

**BERNIER, BENOIT ET JEAN-LOUP ROBERT, 1992***Bassin de sédimentation primaire pour les très petites municipalités - Rapport final*

Université Laval, 157 pages

**BIRCBECK, A. E., D. REIL ET R. HUNTER, 1990***Application of natural and engineered wetlands for treatment of low-strength leachate*

Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 411-418 pages

**BLAKE, G. ET J. P. DUBOIS, 1974***L'épuration des eaux par les plantes aquatiques*

70 pages

**BOUCHARD, REGIS ET ALL., 1992***Les membrannes d'argile pour imperméabiliser les étangs: conception, contrôle, comportement*

Association Québécoise des techniques de l'eau, Science et technique de l'eau, vol 25, no 1, février, pp. 47-52 pages

**BOUTIN, C., 1987***Domestic wastewater treatment in tanks planted with rooted macrophytes: case study; description of the system; design criteria and efficiency*

Article de revue, Water Science and Technology, vol. 19, no. 10, 29-40 pages

**BOWNER, K. H., 1986***Nutrient removal from effluents by artificial wetland: influence of rhizosphere aeration and preferential flow studied using bromide and dye tracers*

Article de revue, Water Research, vol. 21, no. 5, 591- 599 pages

**BRITT, C. R. ET G. A. BRODIE, 1990***Wetlands issues of the Flat Woods Coal Lease and Caryville Industrial Park II*

Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 547-550 pages

**BRIX, H., 1992***Specialist group on the use of macrophytes in water pollution control*

Brix, Hans, Department of plant ecology, University of Aarhus, 36 pages

**BRIX, H., 1991 b***Wastewater treatment in constructed wetlands: An overview of system design, removal processes and treatment performance*

Wetlands Laboratory and the University of West Florida Institute for coastal and estuarine research, Constructed wetlands for water quality improvement, 92-92 pages

- BRIX, H., 1991 a**  
*Macrophyte mediated oxygen transfer in constructed wetlands: Transport mechanisms and rates*  
 Wetlands Laboratory and the University of West Florida Institute for coastal and estuarine research, Constructed wetlands for water quality improvement, 25-25 pages
- BRIX, H., 1987 b**  
*Treatment of wastewater in the rhizosphere of wetland plants*  
 Article de revue, Water Science and technology, vol. 19, no. 1/2, 107- 118 pages
- BRIX, H., 1987 a**  
*The applicability of the wastewater treatment plant in othresen as scientific documentation of the root-zone method*  
 IAWPRC, Water science and technology, Vol.19, No.10, pp. 19-24 pages
- BRIX, H. ET H.-H. SCHIERUP, 1990 b**  
*Soil oxygenation in constructed reed bed: the role of macrophyte and soil-atmosphere interface oxygen transport*  
 Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 53-66 pages
- BRIX, H. ET H.-H. SCHIERUP, 1990 a**  
*Danish Experience with Sewage Treatment in Constructed Wetlands*  
 Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 565-573 pages
- BRIX, H. ET H.-H. SCHIERUP, 1986**  
*Root zone systems - opérationnal experience of danish systems in the initial phase*  
 Rapport pour le comité de protection environnementale, 80 pages
- BRODIE, GREGORY A., 1990 d**  
*Constructed wetlands for treating acid drainage at Tennessee Valley Authority coal facilities*  
 Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 461-470 pages
- BRODIE, GREGORY A., 1990 a**  
*Selection and Evaluation of Sites for Constructed Wastewater Treatment Wetlands*  
 Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 307-317 pages
- BRODIE, GREGORY A., DONALD A. HAMMER AND DAVID A. TOMLJANOVICH, -**  
*Constructed Wetlands for acid drainage control in the Tennessee Valley*  
 9 pages
- BRODIE, GREGORY A., DONALD A. HAMMER ET DAVID A. TOMLJANIVICH, 1990 b**  
*Treatment of Acid Drainage with a Constructed Wetland at the Tennessee Valley Authority 950 Coal Mine*  
 Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 201-210 pages
- BRODIE, GREGORY A., DONALD A. HAMMER ET DAVID A. TOMLJANOVICH, 1990 c**  
*Constructed Wetlands for Treatment of Ash Pond Seepage*  
 Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 211-220 pages
- BUCKSTEEG, K., 1990**  
*Treatment of domestic sewage in emergent helophyte beds - German experiences and ATV-Guidelines H262*  
 Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 505-516 pages
- BURGOON, P. S., K. R. REDDY ET T. A. DEBUSK, 1990**  
*Domestic Wastewater Treatment Using Emergent Plants Cultured in Gravel and Plastic Substrates*  
 Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 536-541 pages

- BURGOON, PETER S. ET ALL., -**  
*Vegetated Submerged beds with artificial substrates IBOD Removal*  
 pp. 394-425 pages
- BURKA, U. ET P. C. LAWRENCE, 1990**  
*A new community approach to waste treatment with higher water plants*  
 Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 359-372 pages
- BUTLER, J. E., M. G. FORD, R. F. LOVERIDGE ET ALL., 1990**  
*Design, construction, establishment and operation of gravel bed hydroponic (GBH) systems for secondary and tertiary sewage treatment*  
 Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 539-542 pages
- CALAWAY, WILSON T., 1957**  
*Sewage works-Intermittent sand filters and their biology*  
 Intermittent sand filters for sewage and industrial wastes, vol 29, n° 1, pp. 1-5 pages
- CAMPBILL WATER, -**  
*Treatment of domestic, agricultural, and industrial sludges and effluents*  
 Dépliant publicitaire, 4 pages
- CEMAGREF, 1990**  
*Les filtres plantés de roseaux*  
 13 pages
- CEMAGREF, 1989**  
*Traitement des eaux résiduaires - Liste des publications*
- CEMAGREF, 1985**  
*Les lits à macrophytes; État actuel des connaissances*  
 15 pages
- CHARBONNEL, YVES, 1989**  
*Manuel de lagunage à macrophytes en régions tropicales*  
 37 pages
- CHRISTIAN, J. N. W., 1990**  
*Reed bed treatment systems: experimental gravel beds at Gravesend - the Southern Water experience*  
 Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 309-320 pages
- COLIN, E., 1989**  
*Suivi et évaluation du fonctionnement du dispositif d'épuration par lits à macrophytes de la commune de Pannessières*  
 Rapport provisoire, 16 pages
- CONNOR, E. S., 1990**  
*Use of constructed wetlands in water pollution control*  
 W.R.C. (Water Research Center), 89 pages
- CONWAY, T. E. ET J. M. MURTHA, 1990**  
*The Iselin Marsh Pond Meadow*  
 Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 139-144 pages
- COOMBES, C., 1990**  
*Reed bed treatment systems in Anglian Water*  
 Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 223-234 pages

- COOPER, P. F., 1990 a**  
*European design and operations guidelines for reed bed treatment systems*  
 Papiers préparés pour conférence tenue à Cambridge en Angleterre, 25 pages
- COOPER, P. F. ET ALL, 1989**  
*Sewage treatment by reed bed systems, the present situation in the U.K.*  
 Water Research Center Stevenage, United Kingdom, Journal of the Institution of water and Environmental Management
- COOPER, P. F. ET ALL., 1990 b**  
*The use of reed bed treatment systems in the U.K.*  
 Article de revue Wat. Sci. tech., vol. 22, no. 3/4, 57-64 pages
- COOPER, P. F. ET FINDLATER, 1990 d**  
*Constructed wetlands in water pollution control*  
 Compte rendus de conférences tenues à Cambridge, U.K., 602 pages
- COOPER, P. F. ET J. A. HOBSON, 1990 c**  
*Sewage Treatment by Reed Bed Systems: The Present Situation in the United Kingdom*  
 Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 153-172 pages
- COSTELLO, C. J., 1990**  
*Wetlands Treatment of Dairy Animal Wastes in Irish Drumlin*  
 Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 702-709 pages
- CROSBY, ROBERT, 1991**  
*A plan for a community greenhouse and waste treatment facility for cold climate regions*  
 Éds. C. Etnier & B. Guterstam, Compte rendu de conférences: Ecological Engineering for wastewater treatment, pp. 161-168 pages
- DAUKAS, P., D. LOWRY ET W. W. WALKER, JR., 1990**  
*Design of Wet Detention Basins and Constructed Wetlands for Treatment of Stormwater Runoff from a Regional Shopping Mall in Massachusetts*  
 Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 686-694 pages
- DAVIDO, R. L. ET T. E. CONWAY, 1990**  
*Nitrification and Denitrification at the Iselin Marsh/Pond/Meadow Facility*  
 Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 477-483 pages
- DAVIES, T. H. ET B. T. HART, 1990 b**  
*Use of aeration to promote nitrification in reed beds treating wastewater*  
 Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 77-84 pages
- DAVIES, T. H. ET B. T. HART, 1990 a**  
*Reed bed treatment of wastewaters in a pilot-scale facility*  
 Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 517-520 pages
- DAVIES, T. H., J. T. WATSON ET D. B. JENKINS, 1990 c**  
*Treatability assessment of industrial wastes by a portable wetland unit*  
 Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 403-410 pages
- DAVIS, ANDREW N. ET BRIGGS TIMOTHY L., -**  
*Dispersion pattern of aerial shoots of the common marsh reed phragmites australis (Poaceae)*

- DE ZEEUW, W., G. HEIJNEN ET J. DE VRIES, 1990**  
*Reed bed treatment as a wastewater (post) treatment alternative in the potato starch industry*  
 Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 551-554 pages
- DEBUSK, T. A., M. A. LANGSTON, P. S. BURGOON ET ALL., 1990 a**  
*A performance comparison of vegetated submerged beds and floating macrophytes for domestic wastewater treatment*  
 Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 301-308 pages
- DEBUSK, T. A., P. S. BURGOON ET K. R. REDDY, 1990 b**  
*Secondary Treatment of Domestic Wastewater Using Floating and Emergent Macrophytes*  
 Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 525-529 pages
- DEELSTRA, TJEERD ET ROB UIT DE BOSCH, 1991**  
*Ecological approaches to wastewater management in urban regions in the netherlands*  
 Éds. C. Etnier & B. Guterstam, Compte rendu de conférences: Ecological Engineering for wastewater treatment, pp. 293-307 pages
- DEMERS, REAL, 1991**  
*Une première québécoise à saveur environnementale*  
 Journal "L'Appel", 3 pages
- DESJARDINS, RAYMOND, 1989**  
*Traitement des eaux usées de la municipalité de St-Jean Baptiste Vianney par un étang d'infiltration habité par de la flore de marais*  
 Centre Écologique du Lac Saint-Jean Inc., 3 pages
- DESROSIERS, GILLES, -**  
*DQMA- Saint-Jean-Baptiste-Vianney*
- DIACHISHIN, A. N., 1991**  
*Performance Enhancing modifications to Imhoff tank/slow sand filter for a small community in ulster county, New York*  
 American Society of Agricultural Engineers, Compte rendu "Sixth national symposium on individual and small community sewage systems", pp. 17-21 pages
- DILL, C. H., 1990**  
*Wastewater Wetlands: User Friendly Mosquito Habitats*  
 Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 664-668 pages
- DIX, STEPHEN P., 1981**  
*Septic Leaching System*  
 Brevet américain #4,303,350, 9 pages
- DOBBERTEEN, ROSS A. ET NORTON H. NICKERSON, 1991**  
*Use of created Cattail (Typha) wetlands in mitigation strategies*  
 Biology Department, Tufts University, 12 pages
- DOGNIAUX, R. ET M. LEMOINE, 1983**  
*Paramétrisation des variations horaires et journalières du rayonnement solaire global et de la température de l'air en Belgique*  
 17 pages
- DORNBUSH, J. N., 1990**  
*Natural Renovation of Leachate-Degraded Groundwater in Excavated Ponds at a Refuse Landfill*  
 Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 743-752 pages

**DUBE, JEAN-PIERRE, 1989**

*Guide technique sur la conception des installations septiques communautaires (petites agglomérations)*  
Société québécoise d'assainissement des eaux /EAT Consultants Inc., EAT. Rapport final, 370 pages

**DYKYJOVA, DAGMAR ET PAZOURKOVA, ZDENKA, 1979**

*A diploid form of phragmites comunis, as a possible result of cytogenetical response to ecological stress*  
Folia geobot, phytotax., praha, 14, 113-120 pages

**EGER, P. ET K. LAPAKKO, 1990**

*Use of Wetlands to Remove Nickel and Copper from Mine Drainage*

Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 780-787 pages

**EHRlich, KARL F., MARIE-CLAUDE CANTIN ET ANDREE TURCOTTE, 1991**

*A diagnostic and ecological approach to the purification of sewage, toxic substances, and water bodies*

Éds. C. Etnier & B. Guterstam, Compte rendu de conférences: Ecological Engineering for wastewater treatment, pp. 95-109 pages

**ELRICK, D. E. ET W. D. REYNOLDS, 1990**

*Methods for analyzing constanthead well permeameter data*

Department of Land Resource Science, University of Guelph, 25 pages

**ENVIRONMENTAL SYSTEMS & TECHNOLOGIES INC., 1988**

*SOILPROP - A program to estimate unsaturated soil hydraulic properties from data - User's guide*

67 pages

**ENVIRONNEMENT CANADA, 1990**

*Wastewater technology Center-Publications and presentations 1972-1989*

**ENVIRONNEMENT CANADA, 1989**

*Traitement des eaux usées par la rhizosphère (racines) et plus particulièrement par les racines du roseau commun: bibliographie*

Publication gouvernementale, Québec, 58 pages

**ESSER, DIRK, 1992**

*Proposition pour le traitement des eaux usées - BTOPARK "ROTIERRAST" OBERGAILBACH (57)*

Société d'ingénierie nature et technique, 8 pages

**ESSER, DIRK, 1989**

*Contribution à la compréhension des mécanismes d'élimination des phosphates pour des systèmes d'épuration rustiques à cultures fixées (lits à macrophytes, lits d'infiltration-percolation)*

81 pages

**EUNANTE INC., -**

*Monolag*

Dépliant publicitaire

**FAULKNER, S. P. ET C. J. RICHARDSON, 1990 b**

*Iron and manganese fractionation in constructed wetlands receiving acid mine drainage*

Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 441-450 pages

**FAULKNER, S. P. ET C. J. RICHARDSON, 1990 a**

*Physical and Chemical Characteristics of Freshwater Wetland*

Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 41-72 pages

**FEIERABEND, J. S., 1990**

*Wetlands: The Lifeblood of Wildlife*

Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 107-120 pages

- FINDLATER, B. C., J. A. HOBSON ET P. F. COOPER, 1990**  
*Reed bed treatment systems: performance evaluation*  
 Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 193-204 pages
- FINLAYSON, C. M., I. VON OERTZEN ET A. J. CHICK, 1990**  
*Treating poultry abattoir and piggery effluents in gravel trenches*  
 Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 559-562 pages
- FISHER, P. J., 1990**  
*Hydraulic characteristics of constructed wetlands at Richmond*  
 Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 21-32 pages
- FITTER, A. H. ET R. K. M. TLAY, 1989**  
*Environmental Physiology of plants, 2nd édition*  
 Academic Press, 423 pages
- FLYGT CANADA, -**  
*Man-made wetlands promise economical wastewater treatment and flood control*  
 Article de revue Flygt, 3 pages
- FONDATION UNIVERSITAIRE LUXEMBOURGEOISE, 1991**  
*Épuration des eaux par mosaïque hiérarchisée d'écosystèmes artificiels - Station expérimentale de Viville*  
 F.U.L., 170 pages
- FREEZE, R. ALLAN ET JOHN A. CHERRY, 1979**  
*Groundwater*  
 Prentice Hall, 588 pages
- FRERE MARIE-VICTORIN, 1964**  
*Flore Laurentienne*  
 Les presses de l'Université de Montréal, 925 pages
- FROSTMAN, THEODORE M., 1992**  
*Evaluation of wetland quality using a numerical functional value matrix*  
 STS Consultants, Ltd, 10 pages
- FROSTMAN, THEODORE M., 1991**  
*System-Wide approach acidie mine drainage abatement*  
 Wetlands Laboratory and the University of West Florida Institute for coastal and estuarine research, Constructed wetlands for water quality improvement, 1-1 pages
- FURMON, THOMAS DES, COLAWAY WILSON T. ET GEORGE R. GRANTHAN, 1955**  
*Intermittent sand filters multiple loadings*  
 Intermittent sand filters for sewage and industrial wastes, vol 27, no 3, pp. 261-276 pages
- GEARHEART, R. A., F. KLOPP ET G. ALLEN, 1990**  
*Constructed Free Surface Wetlands to Treat and Receive Wastewater: Pilot Project to Full Scale*  
 Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 121-138 pages
- GELLER, GUNTHER, 1990 b**  
*Recueil d'articles*
- GELLER, GUNTHER, A. LENZ ET K. KLEYN, 1991**  
*"Planted soil filters" for wastewater treatment: The complex system "Planted soil filter", its components, their development and interdependence*  
 Wetlands Laboratory and the University of West Florida Institute for coastal and estuarine research, Constructed wetlands for water quality improvement, 63-64 pages

- GELLER, GUNTHER, K. KLEYN ET A. LENZ, 1990 a**  
*"Planted soil filters" for wastewater treatment: the complex system "planted soil filter", its components and their development*  
 Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 161-170 pages
- GERSBERG, R. M., R. A. GEARHEART ET M. IVES, 1990 a**  
*Pathogen Removal in Constructed Wetlands*  
 Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 431-446 pages
- GERSBERG, R. M., S. R. LYON, R. BRENNER ET B. V. ELKINS, 1990 b**  
*Integrated Wastewater Treatment Using Artificial Wetlands: A Gravel Marsh Case Study*  
 Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 145-152 pages
- GERVAIS, CAMILLE, 1988**  
*Stratégies de reproduction: le cas de Phragmites Australis et de Claytonia Caroliniana*  
 Revue Eurêka: La recherche agro-alimentaire, numéro 11
- GERVAIS, CAMILLE, 1986**  
*Le complexe phragmites australis (Cav.) Trin. Ex Steud.*  
 Revue Eurêka: La recherche agro-alimentaire
- GIDEON, ORON ET ALL., 1986**  
*Wastewater treatment and renovation by different duckweed species*  
 Article de revue: Journal of Environmental Engineering, volume 112, numéro 3, 241-263 pages
- GIROUARD, JEAN-DENIS, 1992**  
*Une médecine douce pour soigner l'environnement*  
 Le journal de Québec / dimanche 16 février 1992, 18 pages
- GIRTS, M. A. ET R. L. KNIGHT, 1990**  
*Operations Optimization*  
 Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 417-430 pages
- GORENFLOT, R., 1976**  
*Le complexe polyploïde du phragmite australis (Cav.) Trin. ex Steud.)*  
 (=P. communis Trin), (bull. soc. bot. fr.), 123- 261-271 pages
- GRAY, K. R., A. J. BIDDLESTONE, G. JOB ET ALL., 1990**  
*The use of reed beds for the treatment of agricultural effluents*  
 Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 333-346 pages
- GREEN, BEN ET J. UPTON, 1991**  
*Reed bed treatment for small communities: experience in the U.K.*  
 Wetlands Laboratory and the University of West Florida Institute for coastal and estuarine research, Constructed wetlands for water quality improvement, 67-67 pages
- GROSS, M.A. AND J. HESTIR, 1991**  
*A comparison of local waste materials for Sulfate-Reducing wetlands substrate*  
 Wetlands Laboratory and the University of West Florida Institute for coastal and estuarine research, Constructed wetlands for water quality improvement, 3-3 pages
- GROSSE, W., 1990**  
*Thermosmotic Air Transport in Aquatic Plants Affecting Growth Activities and Oxygen*  
 Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 469-476 pages

**GROULX, FRANCE, 1987**

*Desherbage des grandes cultures - Les résidus d'atrazine et la propagation du Phragmite*  
La terre de chez nous, 1987/01/12, 1 pages

**GROUPEMENT EUROPEEN D'INTERET ECONOMIQUE, 1991**

*Techniques d'épuration de l'eau intégrées au paysage naturel*  
Technologie Radoux, 14 pages

**GUIDA, V. G. ET I. J. KUGELMAN, 1990**

*Experiments in Wastewater Polishing in Constructed Tidal Marshes: Does It Work? Are the Results Predictable?*  
Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 727-734 pages

**GUIGNARD, J. L., 1989**

*Abrégés-Botanique 7e édition*  
Masson, 248 pages

**GUNTENSPERGEN, F. ET AL., 1988**

*Wetland vegetation*  
Article de conférence Chattanooga, Tennessee, 16 pages

**GUNTENSPERGEN, G. R., F. STEARNS ET J. A. KADLEC, 1990**

*Wetland Vegetation*  
Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 73-88 pages

**GUTERSTAM, BJORN, 1991**

*Ecological engineering for wastewater treatment: Theoretical foundations and practical realities*  
Éds. C. Etnier & B. Guterstam, Compte rendu de conférences: Ecological Engineering for wastewater treatment, pp. 38-54 pages

**HABERL, R. ET R. PERFLER, 1990 b**

*Seven years of research work and experience with wastewater treatment by a reed bed system*  
Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 205-214 pages

**HABERL, R. ET R. PERFLER, 1990 a**

*Root-Zone System: Mannersdorf—New Results*  
Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 606-621 pages

**HALL, RICHARD, 1989**

*Artificial marshes trim wastewater costs*  
Ministère de l'Environnement du Québec, 2 pages

**HAMEL SERGE, -**

*Rapport de mission en Angleterre et en Allemagne*  
MENVIQ direction de l'assainissement urbain, 20 + Annexes pages

**HAMMER, DONALD A., 1992**

*Creating freshwater wetlands*  
Lewis Publishers Inc., 298 pages

**HAMMER, DONALD A., 1991 b**

*Designing constructed wetlands systems to treat agricultural nonpoint source pollution*  
Tennessee Valley Authority, Controlling Rural Nonpoint Source Pollution Conference, 29 pages

**HAMMER, DONALD A., 1991 a**

*Constructed Wetlands can replace conventional WW treatment*  
Water & Wastewater International — Volume 6, Issue 5, 6 pages

- HAMMER, DONALD A., 1990 b**  
*Water improvement functions of natural and constructed wetlands*  
 Tennessee Valley Authority, Protection and management issues for south Carolina Wetlands, 29 pages
- HAMMER, DONALD A., 1990 a**  
*Constructed Wetlands for acid water treatment an overview of emerging technology*  
 Tennessee Valley Authority, Presentation at the Annual Meeting — Geological Association of Canada  
 Mineralogical Association of Canada, 15 pages
- HAMMER, DONALD A., 1989**  
*Constructed Wetlands for treatment of agricultural waste and urban stormwater*  
 Majumdar, S. K., R. P. Brooks et al., Wetlands Ecology and Conservation: Emphasis in Pennsylvania, 9 pages
- HAMMER, DONALD A., 1988**  
*Constructed wetlands for wastewater treatment, municipal, industrial and agricultural*  
 Lewis Publishers, Compte rendus de conférences tenues à Chattanooga, 818 pages
- HAMMER, DONALD A., b**  
*Constructed Wetlands for municipal wastewater treatment*  
 19 pages
- HAMMER, DONALD A., a**  
*Constructed Wetlands Design Recommendations*  
 8 pages
- HAMMER, DONALD A. AND B. P. PULLIN ET ALL., 1991 c**  
*Treating livestock wastewaters with constructed wetlands*  
 Tennessee Valley Authority, Constructed wetlands for water quality improvement conference, 11 pages
- HAMMER, DONALD A. ET R. K. BASTIAN, 1990 c**  
*Wetlands Ecosystems: Natural Water Purifiers?*  
 Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 5-20 pages
- HANCOCK, JEAN. J. ET LAKSHIME R. BUDD HAVARAPU, -**  
*Advanced wastewater treatment with lemna technology*  
 Lemna Corporation, Compte rendu de conférence "Constructed wetlands for water quality improvement- An international symposium-Pensacola Floride.", pp.21 pages
- HARDY, J. W., 1990**  
*Land Treatment of Municipal Wastewater on Mississippi Sandhill Crane National Wildlife Refuge for Wetlands/Crane Habitat Enhancement: A Status Report*  
 Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 186-190 pages
- HARTOG, C. DEN ET ALL., 1989**  
*Reed a common species in decline*  
 1-4 pages
- HASLAM, S. M., 1973**  
*Some aspects of the life history and autecology of phragmites communis Trin. a review*
- HASLAM, S. M., 1971**  
*The development and establishment of young plants of phragmites communis Trin.*  
 Ann. Bot. 35, 1059-72
- HASLAM, S. M., 1969**  
*Stem types of phragmites communis Trin*  
 Ann. Bot. 33, 127-31

- HASLAM, S. M., 1968**  
*The development and emergence of buds in phragmites communis Trin.*
- HASLAM, S. M., 1958**  
*Biological flora of the british isles*  
List br. vasc. pl. numéro 665.1
- HAWORTH, BROCKMAN, MARGARET, -**  
*Filtre de la nature - Miracle*  
Canards Illimitée, Aile verte, pp. 18-19 pages
- HECKMAN, CHARLES W., 1986**  
*The role of marsh plants in the transport of nutrients as shown by a quantitative model for the freshwater section of the elbe estuary*  
Article de revue "Aquatic Botany" 25, 139-151 pages
- HEDGES, P. D., C. J. BETTS, J. E. DEWAELE ET ALL., 1990**  
*The hydro-botanic treatment of agricultural effluent*  
Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 571-574 pages
- HEDIN, R. S., R. HAMMACK ET D. HYMAN, 1990**  
*Potential Importance of Sulfate Reduction Processes in Wetlands Constructed to Treat Mine Drainage*  
Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 508-514 pages
- HEDIN, R.S., R.W. NAIRN ET H.M. EDENBORN, 1991**  
*Contaminant removal by wetlands constructed to treat polluted coal mine drainage*  
Wetlands Laboratory and the University of West Florida Institute for coastal and estuarine research, Constructed wetlands for water quality improvement, 2-2 pages
- HEEB, JOHANNES ET BRIGITTA ZUST, 1991**  
*Sand and plant filter systems*  
Éds. C. Etnier & B. Guterstam, Compte rendu de conférences: Ecological Engineering for wastewater treatment, pp. 199-207 pages
- HENROT, J., R. K. WIEDER, K. P. HESTON ET M. P. NARDI, 1990**  
*Wetland Treatment of Coal Mine Drainage: Controlled Studies of Iron Retention in Model Wetland Systems*  
Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 793-800 pages
- HERSKOWITZ, JOAN, 1986**  
*Listowell artificial marsh project report*  
Research Advisory Committee Ontario Ministry of Environment
- HICKS, D. B. ET Q. J. STÖBER, 1990**  
*Monitoring of Constructed Wetlands for Wastewater*  
Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 447-458 pages
- HILEY, P. D., 1990 b**  
*Wetlands treatment revival in Yorkshire*  
Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 279-288 pages
- HILEY, P. D., 1990 a**  
*The performance limitations of wetland treatment systems - a discussion*  
Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 535-538 pages

**HINGE, JORGEN ET HAMISH STEWART, 1991**

*Solar wastewater treatment in Denmark: Demonstration project at "Danish Folkecenter for Renewable Energy"*

Éds. C. Etnier & B. Guterstam, Compte rendu de conférences: Ecological Engineering for wastewater treatment, pp. 169-171 pages

**HOBSON, J. A., 1990**

*Hydraulic Considerations and the Design of Reed Bed Treatment Systems*

Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 628-635 pages

**HOCKING, PETER J., 1989**

*Seasonal dynamics of production and nutrient accumulation and cycling by phragmites australis (cav.) Trin. ex. stuedel in a nutrient-enriched swamp in inland australia II individual shots*

Article de revue "Aust. J. Mar. Freshwater Reg." No. 40, 445-464 pages

**HOFFMAN, R. D., 1990**

*Overview from Ducks Unlimited, Inc.*

Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 359-362 pages

**HOFMANN, K., 1990**

*Use of phragmites in sewage sludge treatment*

Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 269-276 pages

**HOFMANN, KARLFRIEDRICH, 1991**

*The role of plants in subsurface flow constructed wetlands*

Éds. C. Etnier & B. Guterstam, Compte rendu de conférences: Ecological Engineering for wastewater treatment, pp. 248-261 pages

**HOUSE, C. H. ET S. W. BROOME, 1990**

*Constructed upland-wetland wastewater treatment system*

Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 567-570 pages

**HOUSE, C. H., S. W. BROOME ET M. T. HOOVER, 1991**

*Constructed Upland - Wetland wastewater treatment efficacy*

American Society of Agricultural Engineers, Compte rendu "Sixth national symposium on individual and small community sewage systems", pp. 346-354 pages

**HOWARD, E. A., J. C. EMERICK ET T. R. WILDEMAN, 1990 a**

*Design and Construction of a Research Site for Passive Mine Drainage Treatment in Idaho Springs, Colorado*

Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 761-764 pages

**HOWARD, E. A., M. C. HESTMARK ET T. D. MARGULIES, 1990 b**

*Determining Feasibility of Using Forest Products or On-Site Materials in the Treatment of Acid Mine Drainage in Colorado*

Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 774-779 pages

**HSIEH, Y.-P. ET C. L. COULTAS, 1990**

*Nitrogen Removal from Freshwater Wetlands: Nitrification-Denitrification Coupling Potential*

Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 493-500 pages

**HUBAC, JEAN-MARIE, 1985**

*Titres et travaux*

Papier de conférences, Laboratoire de systématique et Écologie végétale Associé au C.N.R.S. (La. 121), 9 pages

**HURRY, R. J. ET E. G. BELLINGER, 1990**

*Potential yield and nutrient removal by harvesting of Phalaris arundinacea in a wetland treatment system*  
Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 543-546 pages

**IAWPRC, 1990**

*Newsletter no 4*

Hans Brix - Specialist group on the use of macrophytes in water Pollution Control, 32 pages

**IAWPRC, 1989**

*Small wastewater treatment plants*

Papiers de conférences, 351 pages

**ISMOND, ALAN, 1991**

*The awareness of the engineer as an integral part of ecological wastewater treatment*

Éds. C. Etnier & B. Guterstam, Compte rendu de conférences: Ecological Engineering for wastewater treatment, pp. 325-326 pages

**ISTVANOVICS, V., S. HERODEK, F. SZILAGYI ET ALL., 1990**

*Phosphate retention in the Kis-Balaton protection system - a reconstructed wetland for eutrophication management of Lake Balaton (Hungary)*

Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 579-582 pages

**JACKSON, J., 1990**

*Man-Made Wetlands for Wastewater Treatment: Two Case Studies*

Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 574-580 pages

**JAMES, B. B. ET R. BOGAERT, 1990**

*Wastewater Treatment/Disposal in a Combined Marsh and Forest System Provides for Wildlife Habitat and Recreational Use*

Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 597-605 pages

**JANNI, K. A. ET ALL., 1973**

*Finite element analysis of effluent flow from subsurface sewage disposal fields*

American Society of agricultural engineers, 15 pages

**JENSSEN, PETTER D. ET ARILD VATN, 1991 a**

*Ecologically sound wastewater treatment: Concepts and implementation*

Éds. C. Etnier & B. Guterstam, Compte rendu de conférences: Ecological Engineering for wastewater treatment, pp. 148-160 pages

**JENSSEN, PETTER D., TORE KROGSTAD ET TROND MØEHLUM, 1991 b**

*Wastewater treatment by constructed wetlands in the Norwegian climate: Pretreatment and optimal design*

Éds. C. Etnier & B. Guterstam, Compte rendu de conférences: Ecological Engineering for wastewater treatment, pp. 227-238 pages

**JONG, DR. J., 1975**

*Étangs (lagunes) de stabilisation avec cultures de joncs et de roseaux*

Conférence internationale sur les alternatives en vue de l'amélioration de la qualité de l'eau - Philadelphie E.U.A., 7 pages

**JUNGERSEN, GERT, 1991**

*Resource-saving and ecological aspects of using wastewater from oel breeding as a source of nutrients, water, and carbon dioxide for plant production*

Éds. C. Etnier & B. Guterstam, Compte rendu de conférences: Ecological Engineering for wastewater treatment, pp. 208-215 pages

- KADLEC, JOHN A., 1987**  
*Nutrient dynamics in wetlands*  
 Article de publication "Aquatic Plants for Water Treatment and Ressource Recovery", 393- 419 pages
- KADLEC, JOHN A., 1986 b**  
*Effects of flooding on dissolved and suspended nutrients in small diked marshes*  
 Article de revue, Can. Journal Fishiers Aquat. Sci., volume #43, 1999-2008 pages
- KADLEC, JOHN A., 1986 a**  
*Input-output nutrient budgets for small diked marshes*  
 Article de revue, Can. J. Fish. Aquat. Sci., volume #43, 2009-2016 pages
- KADLEC, R. H., 1990 b**  
*Hydrologic Factors in Wetland Water Treatment*  
 Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 21-40 pages
- KADLEC, R. H., 1990 a**  
*Decomposition in Wastewater Wetlands*  
 Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 459-468 pages
- KADLEC, R. H., D. E. HAMMER ET M. A. GIRTS, 1990 c**  
*A total evaporative constructed wetland treatment system*  
 Pergamon Press, IAOWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 127-138 pages
- KAUTSKY, NILS ET CARL FOLKE, 1991**  
*Integrating open system aquaculture: Ecological engineering for increased production and environmental improvement through nutrient recycling*  
 Éds. C. Etnier & B. Guterstam, Compte rendu de conférences: Ecological Engineering for wastewater treatment, pp. 320-324 pages
- KICKUTH, REINHOLD, 1990**  
*L'épuration des eaux usées par la rhizosphère (par culture de roseaux)*  
 Phragmitech Inc., 25 pages
- KICKUTH, REINHOLD, 1989**  
*Installation for purifying liquids using a through-flow: Controlled aquatic plant-containing filter bed*  
 Brevet déposé États-Unis
- KICKUTH, REINHOLD, 1984**  
*Das Wurzelraumverfahren in der Paris (the application of the Root Zone process)*  
 Sanderdruckaus Landschaft + Stadt, pp. 144-153 pages
- KICKUTH, REINHOLD, 1982**  
*17eth-d for building up defined phosphate deposits from waste phosphates*  
 Brevet Américain #4,331,533, 8 pages
- KICKUTH, REINHOLD, 1979**  
*Conversion and degradation of organic and inorganic nitrogen compounds from heavily loaded wastewaters in amphibic soils*  
 Modelling Nitrogen from wastes, pp. 35-43 pages
- KIM, B. J. ET R. CARDENAS, JR., 1990**  
*Use of reed beds for dewatering sludge in the USA*  
 Pergamon Press, IAOWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 563-566 pages

- KINGSLEY, J. B., J. J. MADDOX ET P. M. GIORDANO, 1990**  
*Aquatic Plant Culture for Waste Treatment and Resource Recovery*  
 Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 542-549 pages
- KINSINGER, WILLIAM C., PAUL S. MANKIEWICZ ET JULIE A. MANKIEWICZ, 1991**  
*A living symbol of participatory ecology: Wastewater, groundwater, and air purification schematics for the René Dubos Bioshelter, planned south transept of the cathedral of St. John the Divine in New York City*  
 Éds. C. Etnier & B. Guterstam, Compte rendu de conférences: Ecological Engineering for wastewater treatment, pp. 327-334 pages
- KNIGHT, R. L. ET M. E. IVERSON, 1990**  
*Design of the Fort Deposit, Alabama, constructed wetlands treatment system*  
 Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 521-524 pages
- KOLBASH, R. L. ET T. L. ROMANOSKI, 1990**  
*Windsor Coal Company Wetland: An Overview*  
 Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 788-792 pages
- LAKSHMAN, G., 1982**  
*Natural and artificial ecosystems for the treatment of wastewaters*  
 Publication du Saskatchewan Research Council #E820-7-E-82, 32 pages
- LAN, C., G. CHEN, L. LI ET ALL., 1990**  
*Purification of wastewater from a Pb/Zn mine using hydrophytes*  
 Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 419-428 pages
- LAVIGNE, RONALD L., 1987**  
*Treatment system for landfill leachate*  
 Brevet Américain #4,678,582, 7 pages
- LAWSON, G. J., 1985**  
*Cultivating reeds for root zone treatment of sewage*  
 Institute of Terrestrial Ecology, 49 pages
- LEFEBVRE, YVES, 1984**  
*L'épuration par le sol, une nouvelle alternative pour l'épuration des eaux usées des petites municipalités*  
 MENVIQ, Direction de l'assainissement des eaux, Service de l'étude du milieu aquatique, 66 pages
- LEMNA CORPORATION, 1991**  
*Lemna Natural Wastewater Treatment Systems*  
 43 pages
- LIENARD, ALAIN, 1991**  
*Traitement des eaux usées domestiques par lits d'infiltration-Percolation sur sable-Étude expérimentale du site de Saint-Symphorien de Lay - Suivis et rapport définitif*  
 105 pages
- LIENARD, ALAIN ET ALL., 1990 c**  
*Recueil d'articles*
- LIENARD, ALAIN, C. BOUTIN ET D. ESSER, 1990 a**  
*Domestic wastewater treatment with emergent hydrophyte beds in France*  
 Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 183-192 pages
- LIENARD, ALAIN, D. ESSER, A. DEGUIN ET ALL., 1990 b**  
*Sludge dewatering and drying in reed beds: an interesting solution? General investigation and first trials in France*  
 Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 257-268 pages

**LINKER, L. C., 1990**

*Creation of Wetlands for the Improvement of Water Quality: A Proposal for the Joint Use of Highway Right-of-Way*  
Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 695-701 pages

**LITCHFIELD, D. K., 1990 b**

*Constructed wetlands for wastewater treatment at Amoco Oil Company's Mandan, North Dakota, Refinery*  
Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 399-402 pages

**LITCHFIELD, D. K. ET D. D. SCHATZ, 1990 a**

*Constructed Wetlands for Wastewater Treatment at Amoco Oil Company's Manda, North Dakota Refinery*  
Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 233-238 pages

**LIVINGSTON, E. H., 1990**

*Use of Wetlands for Urban Stormwater Management*

Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 253-264 pages

**LOWE, E. F., D. L. STITES ET L. E. BATTOE, 1990**

*Potential Role of Marsh Creation in Restoration of Hypertrophic Lakes*

Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 710-718 pages

**LOWE, N. R., 1990**

*The need for hydrophyte-based systems in the treatment of waste water from small communities*

Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 1-10 pages

**LOWGREN, MARIANNE ET ALL., 1989**

*Wastewater treatment or ressource management: a comparison between centralized and on-site systems*

Article de revue "Journal of Environmental management" 28, 71-84 pages

**LUEBKE, ROBERT W., 1983**

*Sheet Useful as a reservoir liner*

Brevet Américain #4,388,357, 7 pages

**M.A.P.A.Q. - GOUVERNEMENT DU QUEBEC, 1989**

*Drainage souterrain - cahier des normes - AGDEX 555*

Conseil des productions végétales du Québec, 78 pages

**MACKNEY, B. J., 1990**

*The design of wetlands for wastewater treatment: an Australian perspective*

Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 471-480 pages

**MADDOX, J. J. ET J. B. KINGSLEY, 1990**

*Waste Treatment for Confined Swine with an Integrated Artificial Wetland and Aquaculture System*

Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 191-200 pages

**MANDER, ULO, OLEV MATT ET URMAS NUGIN, 1991**

*Perspectives on vegetated shoals, ponds, and ditches as extensive outdoor systems of wastewater treatment in Estonia*

Éds. C. Etnier & B. Guterstam, Compte rendu de conférences: Ecological Engineering for wastewater treatment, pp. 271-283 pages

**MANFRINATO, E. S., E. S. FILHO ET E. SALATI, 1990**

*Water supply system utilizing the edaphic-phytodepuration technique*

Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 591-594 pages

**MANN, R. A., 1990**

*Phosphorus removal by constructed wetlands: substratum absorption*  
Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 97-106 pages

**MARA, D. D., ET M. H. F. MARECAS DO MONTE, 1990**

*The design and operation of waste stabilization ponds in surist areas of mditerranean Europe*  
IAWPRC, Water Science and Technology vol. 22 no. 3/4, pp. 73-76 pages

**MARBLE, ANNE D., 1992**

*A Guide to Wetland Functional Design*  
Lewis Publishers, inc., 222 pages

**MARIN, MARC, 1992**

*Assises annuelles de l'AQTE: Aquaculture en serres appliquée au traitement des eaux usées pour les petites municipalités*  
Le groupe Steica, 20 pages

**MARSCHLOK, JOHN, 1987**

*Free access intermittent sand filter*  
New York State Department of Environmental Conservation, Rapports 1 et 2, I/A Technology Evaluation, no C-36-1191-02 et C-36-1277-02, 19 pages

**MARTIN, C. V. ET B. F. ELDRIDGE, 1990**

*California's Experience with Mosquitoes in Aquatic Wastewater Treatment Systems*  
Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 393-398 pages

**MAY, E. J. E. BUTLER, M. G. FORD ET ALL., 1990**

*Chemical and microbiological processes in gravel-bed hydroponic (GBH) systems for sewage treatment*  
Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 33-40 pages

**MEIORIN, E. C., 1990**

*Urban Runoff Treatment in a Fresh/Brackish Water Marsh in Fremont, California*  
Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 677-685 pages

**MERISAAR, MARET, 1991**

*Ecological approaches to treatment of wastewater from potato processing*  
Éds. C. Etnier & B. Guterstam, Compte rendu de conférences: Ecological Engineering for wastewater treatment, pp. 308-311 pages

**METCALF ET EDDY INC., 1979**

*Wastewater engineering: treatment, disposal, reuse*  
2e édition, McGraw Hill, 920 pages

**METTETAL, J. P. ET ALL., 1991**

*Épuration par infiltration sur sable; Suivi et évaluation*

**METTETAL, J. P. ET ALL., 1990**

*Suivi et évaluation du dispositif d'épuration par lits à macrophytes de Pannessières*  
15 pages

**MEULEMAN, A. F. M., B. BELTMAN ET H. DE BRUIN, 1990**

*The use of vegetated ditches for water quality improvement: a tool for nature conservation in wetlands areas*  
Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 599-602 pages

**MICHAUD, S. C. ET C. J. RICHARDSON, 1990**

*Relative Radial Oxygen Loss in Five Wetland Plants*  
Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 501-507 pages

**MILLER, G., 1990***Use of Artificial Cattail Marshes to Treat Sewage in Northern Ontario, Canada*

Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 636-642 pages

**MINGEE, T. J. ET R. W. CRITES, 1990***Constructed Wetlands for Secondary Treatment*

Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 622-627 pages

**MITCHELL, D. S., P. F. BREEN ET A. J. CHICK, 1990***Artificial wetlands for treating wastewaters from single households and small communities*

Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 383-390 pages

**MITCHELL, DEE, -***Using upflow anaerobic filters as pretreatment for sand filtration of septic tank effluent*

University of Arkansas, 5 pages

**MONNETT, G. T., R. B. RENEAU, JR. ET C. HAGEDORN, 1991***Evaluation of on site sewage spray irrigation for disposal on marginal soils*

American Society of Agricultural Engineers, Compte rendu "Sixth national symposium on individual and small community sewage systems", pp. 362-370 pages

**MOSHIRI, DR. GERALD A. ET CHARLOS C. MILLER, 1991***An integrated solid waste facility design involving recycling, volume reduction, and wetlands leachate treatment*

Constructed wetlands for the water quality Improvement an international symposium, 15 pages

**MULLER, H. E., -***Hygienische Aspekte der landwirtsch Ft-lichem verwertung von Abasser und klärschlamm*

Natur wissanschaften, pp. 238-248 pages

**NATIONAL SMALL FLOWS CLEARINGHOUSE, 1990 b***Constructed wetlands growing throughout U.S.*

5 pages

**NATIONAL SMALL FLOWS CLEARINGHOUSE, 1990 a***Cooperative effort leads to innovative treatment system for North Carolina subdivision*

4 pages

**NETTER, R. ET W. BISCHOFBERGER, 1990 b***Hydraulic investigations on planted soil filters*

Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 11-20 pages

**NETTER, R. ET W. BISCHOFBERGER, 1990 a***Sewage treatment by planted soil filters*

Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 525-528 pages

**NICHOLS, D. S., 1983***Capacity of natural wetlands to remove nutrients from wastewater*

Article de revue, Journal Water Pollution control Federation, vol. 55, no. 5, 495- 505 pages

**NIELSEN, S. M., 1990***Sludge dewatering and mineralisation in reed bed systems*

Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 245-256 pages

**NIKLAS, J., 1990***Optimizing strategies in hydrophyte systems for sewage treatment*

Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 595-598 pages

**OBARSKA-PEMPKOWIAK, HANNA, 1991**

*Seasonal variations in the efficiency of nutrient removal from domestic effluent in a quasi-natural field of reeds (Phragmites communis)*

Éds. C. Etnier & B. Guterstam, Compte rendu de conférences: Ecological Engineering for wastewater treatment, pp. 239-247 pages

**OLAH, JANOS ET FERENC PEKAR, 1991**

*Wastewater-fed fishculture in Hungary*

Éds. C. Etnier & B. Guterstam, Compte rendu de conférences: Ecological Engineering for wastewater treatment, pp. 125-133 pages

**OLDHAM ET AL., 1974**

*Pivotable fluid diverter for recirculation system*

Brevet américain # 3,789,986, 8 pages

**OOSTROM, A. J. VAN ET R. N. COOPER, 1990**

*Meat processing effluent treatment in surface-flow and gravel-bed constructed wastewater wetlands*

Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 321-332 pages

**OTIS, RICHARD J., -**

*On site wastewater treatment intermittent sand filters*

Rural Systems Engineering, 21 pages

**PARR, T. W., 1990**

*Factors affecting reed (Phragmites australis) growth in UK reed bed treatment systems*

Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 67-76 pages

**PARR, T. W., 1987**

*Experimental studies on the propagation and establishment of reeds (phragmites australis) for root zone treatment of sewage*

51 pages

**PAULY, U., 1990**

*Performance data of a wastewater and sludge treatment plant derived from the root zone method set against the background of detention times*

Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 289-300 pages

**PHILIP, J. R., 1957 c**

*The theory of infiltration:5. The influence of initial moisture content*

Commonwealth scientific and Industrial research organisation, Soil science, vol 84, pp. 329-339 pages

**PHILIP, J. R., 1957 b**

*The theory of infiltration:6.Effect of water depth oversoil*

Commonwealth scientific and Industrial research organisation, Soil science, vol 84, pp.278-286 pages

**PHILIP, J. R., 1957 a**

*The theory of infiltration:7.*

Commonwealth scientific and Industrial research organisation, Soil science, vol 54, pp.333-337 pages

**PHILIP, J. R., 1956 d**

*The theory of infiltration 1: the infiltration equation and its solution*

Commonwealth scientific and Industrial research organisation, Soil science, vol 83, pp. 345-357 pages

**PHILIP, J. R., 1956 c**

*The theory of infiltration: 2. The profile of infinity*

Commonwealth scientific and Industrial research organisation, Soil science, vol 83, pp. 435-448 pages

**PHILIP, J. R., 1956 b**

*The theory of infiltration:3.Moisture profiles and relation to experiment*

Commonwealth scientific and Industrial research organisation, Soil science, vol 83, pp. 163-179 pages

- PHILIP, J. R., 1956 a**  
*The theory of infiltration:4.Sorptivity and algebraic infiltration equations*  
 Commonwealth scientific and Industrial research organisation, Soil science, vol 83, pp. 257-265 pages
- PHILIPPS, JONATHAN D., 1987**  
*Shoreline processes and establishment of phragmites australis in a coastal plain estuary*  
 Vegetation 71, pp. 131-144 pages
- PHRAGMITECH(KWS) INC., 1992**  
*Procédé d'épuration par la rhizosphère: une méthode naturelle pour épurer les eaux usées*
- PHRAGMITECH(KWS) INC., -**  
*L'épuration des eaux usées par la rhizosphère*
- PLOSZ ET AL., 1982**  
*Water putification process and aparatus*  
 Brevet américain #4,333,837, 8 pages
- POPE, PAMELA R., 1981**  
*Wastewater treatment by rooted aquatic plants in sand and gravel tienches*  
 Publication EPA # EPA-600/2-81-091, 23 pages
- PORTIER, R. J, 1990 a**  
*Evaluation of Specific Microbiological Assays for Constructed Wetlands Wastewater Treatment Management*  
 Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 515-524 pages
- PORTIER, R. J. ET S. J. PALMER, 1990 b**  
*Wetlands Microbiology: Form, Function, Processes*  
 Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 89-106 pages
- PUJOLD, R. ET ALAIN LIENARD, 1990**  
*Qualitative and quantitative characterization of waste water for small communities*  
 Article de revue "Wat. Sci. Tech.", vol. 22, no. 3/4, 253-260 pages
- QAZIM, S., 1985**  
*Wastewater treatment plants, planning, design and operations*  
 Holt, Rinehart and Winston, 726 pages
- RADOUX, MICHEL, 1991 b**  
*La polution et l'épuration des eaux dans le monde.*  
 Fondation Universitaire Luxembourgeoise, Recueil- Epuration des eaux par mosaïque hiérarchisée d'écosystèmes artificiels, 8 pages
- RADOUX, MICHEL, 1991 a**  
*Rôle de la fréquence des prélèvements de la biomasse produite sur les capacités épuratrices de Lemna miror L.*  
 Fondation Universitaire Luxembourgeoise, Recueil - Epuration des eaux par mosaïque hiérarchisée d'écosystèmes artificiels, p.12 pages
- RADOUX, MICHEL, 1989**  
*Epuration des eaux par hydrosère*  
 Fondation Universitaire Luxembourgeoise, Recueil- Epuration des eaux par mosaïque hiérarchisée d'écosystèmes artificiels, pp.62-68 pages
- RADOUX, MICHEL, 1986 c**  
*Epuration des eaux usées domestiques par hydrosères reconstituées sous climat tempéré. Hypothèses d'application sous climat sahélien.*  
 Fondation Universitaire Luxembourgeoise, Recueil- Epuration des eaux par mosaïque hiérarchisée d'écosystèmes artificiels, pp. 11-20 pages

**RADOUX, MICHEL, 1986 b**

*Etude expérimentale de l'épuration de rejets domestiques par des marais artificiels.*

Fondation Universitaire Luxembourgeoise, Recueil- Epuration des eaux par mosaïque hiérarchisée d'écosystèmes artificiels , pp. 94-100 pages

**RADOUX, MICHEL, 1986 a**

*Etude expérimentale de l'épuration de rejets domestiques par des marais artificiels.*

Fondation Universitaire Luxembourgeoise, Recueil- Epuration des eaux par mosaïque hiérarchisée d'écosystèmes artificiels, pp. 83-90 pages

**RADOUX, MICHEL, 1982**

*Etude comparée des capacités épuratrices d'un lagunage et d'un marais artificiel miniature recevant la même eau usée en zone rurale*

Fondation Universitaire Luxembourgeoise, Recueil- Epuration des eaux par mosaïque hiérarchisée d'écosystèmes artificiels , pp. 346-352 pages

**RADOUX, MICHEL, 1980**

*Approche écologique et expérimentale des potentialités épuratrices du roseau commun: Phragmites australis*

Fondation Universitaire Luxembourgeoise, Recueil- Epuration des eaux par mosaïque hiérarchisée d'écosystèmes artificiels, pp. 329-339 pages

**RADOUX, MICHEL, 1977**

*Contribution à l'étude de la productivité de la structure et du fonctionnement de roselières des districts Mosan et Lorrain*

225 pages

**RADOUX, MICHEL ET D. KEMP, 1991 d**

*Le rôle des "macrophytes" dans l'épuration des eaux usées par hydrosère reconstituée: le cas d'un héliophyte Typha latifolia L..*

Fondation Universitaire Luxembourgeoise, Recueil- Epuration des eaux par mosaïque hiérarchisée d'écosystèmes artificiels , p.18 pages

**RADOUX, MICHEL ET D. KEMP, 1990 b**

*The impact of ageing on the purification efficiency of a plantain of Thipha latifolia L.*

Fondation Universitaire Luxembourgeoise, Recueil - Epuration des eaux par mosaïque hiérarchisée d'écosystèmes artificiels, pp. 149-159 pages

**RADOUX, MICHEL ET D. KEMP, 1990 a**

*The impact of ageing on the purification efficiency of a plantation of Typha latifolia L.*

Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 149-160 pages

**RADOUX, MICHEL ET D. KEMP, 1988**

*Etude comparée des eaux usées domestiques par trois plantations héliophytiques et par un lagunage à microphytes sous un même climat tempéré.*

Fondation Universitaire Luxembourgeoise, Recueil- Epuration des eaux par mosaïque hiérarchisée d'écosystèmes artificiels, pp. 25-38 pages

**RADOUX, MICHEL ET M. NEMCOVA, 1991 e**

*Epuration des eaux usées par écosystèmes reconstitués: La station expérimentale de Viville. Bilan et perspectives.*

Fondation Universitaire Luxembourgeoise, Recueil - Epuration des eaux par mosaïque hiérarchisée d'écosystèmes artificiels, p.12 pages

**RADOUX, MICHEL, D. KEMP, B. DEBROUX ET C. DELVAUX, 1991 c**

*Réhabilitation d'une friche industrielle. L'aménagement intégré du terroir de Germignies avec les eaux usées urbaines de Lallaing*

Fondation Universitaire Luxembourgeoise, Recueil - Epuration des eaux par mosaïque hiérarchisée d'écosystèmes artificiels, pp. 27-31 pages

**RAYMOND, LOUIS, 1979***Fonctionnement et entretien des installations septiques*

Manuel de formation #EPS 6-QR-79-1F du service de la protection de l'Environnement d'Environnement Canada

**REDDY, K. R. ET ALL., 1989***Oxygen Transport through Aquatic macrophytes - The role in wastewater treatment*

Journal Environment Quality no. 19, pp. 261-267 pages

**REED, SHERWOOD ET DONALD BROWN, 1991***Constructed Wetland design the second generation*

WPCF, WPCF 64 th annual conference and exposition papers #AC91-046-003, 10 pages

**REID, G. K., 1984***La vie de l'étang (Guide des plantes et animaux communs aux lacs et étangs de l'Amérique du Nord)*

Édition Marcel Broquet, 159 pages

**RIJS, G. B. ET S. VEENSTRA, 1990***Artificial reed beds as post treatment for anaerobic effluents - urban sanitation in developing countries*

Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 583-586 pages

**ROBIN, J. ET R. STEINHARDT, 1963***Soil water relations during rain infiltration=l. theory*

Soil science society proceedings, pp. 246-251 pages

**ROBIN, J., R. SKEINHARDT ET P. REINIGER, 1964***Soil water relations during rain infiltration:II moisture content profiles during rains of low intensities*

Soil science society of American proceedings, vol 23, no 1, pp. 1-5 pages

**ROGERS, K. H., P. F. BREEN ET A. J. CHICK, 1990***Hydraulics, root distribution and phosphorus removal in experimental wetland systems*

Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 587-590 pages

**RUSHFORTH, GUINN, S. J., 1984***The effects of burning and ploughing on phragmites (Phragmites Australis) at Beauharnois marsh*

Progress report

**SATHER, J. H., 1990***Ancillary Benefits of Wetlands Constructed Primarily for Wastewater Treatment*

Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 353-358 pages

**SCHEUERMAN, P. R., G. BITTON ET S. R. FARRAH, 1990***Fate of Microbial Indicators and Viruses in a Forested Wetland*

Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 657-663 pages

**SCHIERUP, HANS-HENVIK ET H. BRIX, 1990 a***Danish Experience with emergent hydrophyte treatment systems (EHTS) and prospects in the light of future requirements on outlet water quality*

IAWPRC, Water Science and Technology vol. 22 n. 3/4 pp. 65-72, pp. 65 pages

**SCHIERUP, HANS-HENVIK, H. BRIX ET B. LORENZEN, 1990 c***Spildevands forskning fra miljøstyrelsen - investigation concerning the state of the art of Danish constructed reed beds*

Rapport gouvernemental danois, numéro 8, 87 pages

**SCHIERUP, HANS-HENVIK, H. BRIX ET B. LORENZEN, 1990 b***Wastewater treatment in constructed reed beds in Denmark - state of the art*

Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 495-504 pages

- SCHIERUP, HANS-HENVIK, H. BRIX ET B. LORENZEN, -**  
*Wastewater Treatment in Constructed Reed Beds in Denmark - State of the art*  
 pp. 495-504 pages
- SCHUTE, H., 1990**  
*Comparative studies on intermittently charged and continuously fed helophyte beds for domestic waste-water treatment*  
 Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 555-558 pages
- SCHWARTZ, A. L. ET R. L. KNIGHT, 1990**  
*Some Ancillary Benefits of a Natural Land Treatment System*  
 Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 643-645 pages
- SEIDEL, KATHE, 1973**  
*System for purification of polluted water*  
 Brevet américain #3,770,623, 8 pages
- SEIDEL, KATHE ET ALL., 1978**  
*Contributions to revitalisation of waters*  
 Publication du Stiftung Limon logische Arbeitsgruppe, Meerbusch, 62 pages
- SERFLING, STEVENS ET DOMINICK MENDOLA, 1979**  
*Bouyant contact surfaces in waste treatment pond*  
 Brevet américain #4,169,050, 9 pages
- SHERWOOD, C. REED, P. E., 1990**  
*An inventory of constructed wetlands used for wastewater treatment in the United States*  
 Préparé pour le U.S.E.P.A., 163 pages
- SIEMAK, ROBERT C., 1984**  
*Tertiary filtration: Practical design considerations*  
 Journal WPCF, Vol. 56, no. 8, 944- 949 pages
- SIEVERS, D. M., 1991**  
*A submerged wetland for on-site sewage treatment*  
 American Society of Agricultural Engineers, Compte rendu "Sixth national symposium on individual and small community sewage systems", pp. 355-361 pages
- SIFA, LI, 1991**  
*Aquaculture and its role in ecological wastewater treatment*  
 Éds. C. Etnier & B. Guterstam, Compte rendu de conférences: Ecological Engineering for wastewater treatment, pp. 216-226 pages
- SILVER, M., 1990**  
*Biology and Chemistry of Generation, Prevention and Abatement of Acid Mine Drainage*  
 Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 753-760 pages
- SILVERMAN, G. S., 1990**  
*Development of an Urban Runoff Treatment Wetlands in Fremont, California*  
 Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 669-676 pages
- SLAYDEN, R. L., JR. ET L. N. SCHWARTZ, 1990**  
*States' Activities, Attitudes and Policies Concerning Constructed Wetlands for Wastewater Treatment*  
 Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 279-286 pages

**SMARDON, R. C., 1990**

*Human Perception of Utilization of Wetlands for Waste Assimilation, or How Do You Make a Silk Purse Out of a Sow's Ear?*

Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 287-296 pages

**SMITH, A. J., 1990**

*Wastewaters: A Perspective*

Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 3-4 pages

**SNODDY, E. L., G. A. BRODIE, D. A. HAMMER ET D. A. TOMLJANOVICH, 1990**

*Control of the Armyworm, *Simyra Henrici* (Lepidoptera: Noctuidae), on Cattail Plantings in Acid Drainage Treatment Wetlands at Widows Creek Steam-Electric Plant*

Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 808-812 pages

**SOWERS, GEORGE B. ET GEORGE F. SOWERS, 1970**

*Introductory soil mechanics and foundations- 3th edition*

Macmillan Publishing Co., 543 pages

**SPENCER, ROBERT, 1990**

*Solar aquatic treatment of septage*

Article de revue "Biocycle", 5 pages

**SQAE, 1987**

*Municipalité de Saint-Donat; Traitement des eaux usées*

Document d'appel d'offre

**STAUBITZ, W. W. ET ALL, 1990**

*Potential Use of Constructed Wetlands to Treat Landfill Leachate*

Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 735-742 pages

**STEINER, G. R. ET R. J. FREEMAN, JR., 1990**

*Configuration and Substrate Design Considerations for Constructed Wetlands Wastewater Treatment*

Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 363-378 pages

**STEINER, GERALD R., JAMES T. WATSON ET KIMBERLY D. CHOATE, 1991**

*General design, construction and operation guidelines: constructed wetlands wastewater treatment systems for small users including individual residences*

23 pages

**STENGEL, E. ET R. SCHULTZ-HOCK, 1990**

*Denitrification in Artificial Wetlands*

Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 484-492 pages

**STENSUND FOLK COLLEGE, 1991**

*Ecological Engineering for wastewater treatment*

365 pages

**STEVENS, S. E., JR., K. DIONIS ET L. R. STARK, 1990**

*Manganese and Iron Encrustation on Green Algae Living in Acid Mine Drainage*

Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 765-773 pages

**STEWART, HAMISH, GEORGE CHAN ET JORGEN HINGE, 1991***Energy budget for a polyculture-based wastewater treatment system*

Éds. C. Etnier &amp; B. Guterstam, Compte rendu de conférences: Ecological Engineering for wastewater treatment, pp. 181-189 pages

**SUNDBLAD, KARIN ET HANS-B WITGREN, 1989***Glyceria maxima for wastewater nutrient removal and forage production*

Article de revue "Biological wastes", numéro 27, 29-42 pages

**SUNDBLAD, KARIN ET HANS-B. WITGREN, 1991***Wastewater nutrient removal and recovery in an infiltration wetland*

Éds. C. Etnier &amp; B. Guterstam, Compte rendu de conférences: Ecological Engineering for wastewater treatment, pp. 190-198 pages

**SUZUKI, T., W. G. A. NISSANKA ET Y. KURIHARA, 1990***Amplification of Total Dry matter, Nitrogen and Phosphorus Removal from Stands of Phragmites australis by Harvesting and Reharvesting Regenerated Shoots*

Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 530-535 pages

**SWINDELL, C. E. ET J. A. JACKSON, 1990***Constructed wetlands design and operation to maximize nutrient removal capabilities*

Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 107-114 pages

**TARUTIS, W. J., JR ET R. F. UNZ, 1990***Chemical diagenesis of iron and manganese in constructed wetlands receiving acidic mine drainage*

Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 429-440 pages

**TCHOBANOGLIOUS, GEORGE, 1991***Land-based systems, constructed wetlands, and aquatic plant systems in the United States: An overview*

Éds. C. Etnier &amp; B. Guterstam, Compte rendu de conférences: Ecological Engineering for wastewater treatment, pp. 110-120 pages

**TEAL, JOHN, 1991***Contributions of marshes and salt marshes to ecological engineering*

Éds. C. Etnier &amp; B. Guterstam, Compte rendu de conférences: Ecological Engineering for wastewater treatment, pp. 55-62 pages

**TENNESSEN, K., 1991***Production and suppression of pest mosquitoes in constructed wetlands*

Wetlands Laboratory and the University of West Florida Institute for coastal and estuarine research, Constructed wetlands for water quality improvement, 55-55 pages

**THUT, R. N., 1990***Utilization of Artificial Marshes for Treatment of Pulp Mill Effluents*

Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 239-244 pages

**TOMLJANOVICH, D. A. ET O. PEREZ, 1990***Constructing the Wastewater Treatment Wetland—Some Factors to Consider*

Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 399-404 pages

**TRAUTMANN, N. M., J. H. MARTIN, JR., K. S. PORTER ET K. C. HAWK, JR., 1990***Use of Artificial Wetlands for Treatment of Municipal Solid Waste Landfill Leachate*

Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 245-252 pages

- TRUDGILL, S. T., A. L. HEATHWAITE ET T. P. BURT, 1990**  
*Wetland control of sewage point sources of nitrate and phosphate, Slapton, S. Devon*  
 Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 575-578 pages
- TYLER, JERRY E. ET JAMES C. CONVERSE, 1974**  
*Soil evaluation and design selection for large or cluster wastewater soil absorption systems*  
 A.S.E.A, pp. 179-189 pages
- U.S.E.P.A., 1988**  
*Design manual, constructed wetlands and aquatic plant systems for municipal wastewater treatment*  
 United States Environmental Protection Agency, 83 pages
- U.S.E.P.A., 1987**  
*Report on the use of wetlands for municipal wastewater treatment and disposal*  
 EPA 430/09-88-005
- U.S.E.P.A., 1985**  
*Freshwater wetlands for wastewater management*  
 Environmental Assessment Handbook
- U.S.E.P.A., 1978**  
*A comparison of oxidation ditch plants to competing processes for secondary and advanced treatment on municipal wastes*  
 Environmental Protection Technology series #EPA-600/2-78-051
- U.S.E.P.A., 1974**  
*Wastewater filtration - Design considerations*  
 EPA Technology Transfer Seminar Publication, Numéro EPA-625/4-74-0079, 48 pages
- UPTON, J. ET P. GRIFFIN, 1990**  
*Reed bed treatment for sewer dykes*  
 Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 391-398 pages
- VISSMAN, WARREN JR. ET ALL., 1977**  
*Introduction to hydrology - second édition*  
 Russel C. Brinker, 704 pages
- VILLENEUVE, R. ET AL, 1992 c**  
*Contribution à la compréhension de l'écologie des phragmites (roseaux) au Québec - V.1.3 - Volume 3*  
 Consultants RSA
- VILLENEUVE, R. ET AL, 1992 b**  
*Contribution à la compréhension de l'écologie des phragmites (roseaux) au Québec - V.1.3 - Volume 2*  
 Consultants RSA
- VILLENEUVE, R. ET AL, 1992 a**  
*Contribution à la compréhension de l'écologie des phragmites (roseaux) au Québec - V.1.3 - Volume 1*  
 Consultants RSA, 59 pages
- VILLENEUVE, R. ET AL, 1990**  
*Complément au rapport d'étape II de l'étude préliminaire, Municipalité de Saint-Vianney*  
 Consultants RSA, SQAE - Programme d'assainissement des eaux du Québec
- VILLENEUVE, R. ET AL, 1989 c**  
*Rapport d'études préliminaires/étape III, municipalité de Saint-Vianney*  
 Consultants RSA, SQAE - Étape #3, Programme d'assainissement des eaux du Québec
- VILLENEUVE, R. ET AL, 1989 b**  
*Filtre à sable ensemencé; Municipalité de Saint-Vianney-Addenda à l'étude préliminaire / étape #2*  
 Consultants RSA, Programme d'assainissement des eaux du Québec

**VILLENEUVE, R. ET AL, 1989 a**

*Rapport d'étude préliminaire-Étape II, Municipalité de Saint-Vianney*  
Consultants RSA, SQAÉ - Programme d'assainissement des eaux du Québec

**VOSS, CLIFFORD I., 1984**

*SUTRA - Saturated-Unsaturated TRANsport: A finite element simulation model for saturated-unsaturated fluid density-dependent groundwater flow with energy transport or chemically reactive single species solute transport*  
U.S. Geological Survey, 409 pages

**VYMAZAL, J., 1990 b**

*Use of reed-bed systems for the treatment of concentrated wastes from agriculture*  
Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 347-358 pages

**VYMAZAL, J., 1990 a**

*Use of Periphyton for Nutrient Removal From Waters*  
Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 558-564 pages

**W.P.C.F., 1990**

*Natural systems for wastewater treatment*  
Manuel de pratique #FD-16, 255 pages

**WALTERS, DANIEL H., 1986 b**

*Iselin, Pennsylvania Marsh-Pondmeadow treatment facility*  
U.S.E.P.A. National Small Flows Clearinghouse, 5 pages

**WALTERS, DANIEL H., 1986 a**

*Canon Beach, Oregon, Wetlands/Marsh*  
U.S.E.P.A. National Small Flows Clearinghouse, 12 pages

**WARNE, BENGT, 1991**

*Stensund Wastewater Aquaculture: The building*  
Éds. C. Etnier & B. Guterstam, Compte rendu de conférences: Ecological Engineering for wastewater treatment, pp. 176-180 pages

**WATSON, JAMES T. ET ANDREW J. DANZIG, 1991**

*Pilot Scale Nitrification Studies Using Vertical Flow and Shallow Horizontal Flow Constructed Wetland Cells*  
Tennessee Valley Authority - Water Quality Department, pp. 16 pages

**WATSON, JAMES T. ET J. A. HOBSON, 1990 a**

*Hydraulic Design Considerations and Control Structures for Constructed Wetlands for Wastewater Treatment*  
Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 379-392 pages

**WATSON, JAMES T., K. D. CHOATE ET G. R. STEINER, 1990 c**

*Performance of constructed wetland treatment systems at Benton, Hardin, and Pembroke, Kentucky, during the early vegetation establishment phase*  
Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 171-182 pages

**WATSON, JAMES T., S. C. REED, R. H. KADLEC ET ALL., 1990 b**

*Performance Expectations and Loading Rates for Constructed Wetlands*  
Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 319-352 pages

**WEISNER, STEFAN E. B., 1990**

*Emergent vegetation in eutrophic lakes: distributional patterns and ecophysiological constraints Lund*  
84 pages

**WENERICK, W. R., S. E. STEVENS, JR., H. J. WEBSTER ET ALL., 1990***Tolerance of Three Wetland Plant Species to Acid Mine Drainage: A Greenhouse Study*

Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 801-808 pages

**WHALEN, K. J., P. S. LOMBARDO, D. B. WILE ET T. H. NEEL, 1990***Constructed Wetlands: Design, Construction and Costs*

Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 590-596 pages

**WHITE, NIKOLAS F. ET ALL., 1970***Physics of desaturation in porous materials*

American society of civil engineers, Journal of then irrigation and drainage division, vol 96, no 1R1, pp. 165-191 pages

**WIEDER, R. K., G. TCHOBANOGLIOUS ET R. W. TUTTLE, 1990***Preliminary Considerations Regarding Constructed Wetlands for Wastewater Treatment*

Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 297-306 pages

**WILDEMAN, T. R. ET L. S. LAUDON, 1990***Use of Wetlands for Treatment of Environmental Problems in Mining: Non-Coal-Mining Applications*

Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 221-232 pages

**WILHELM, M., S. R. LAWRY ET D. D. HARDY, 1990***Creation and Management of Wetlands Using Municipal Wastewater in Northern Arizona: A Status Report*

Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 179-185 pages

**WILLADSEN, C.T., O. RIGER-KUSK ET B. QVIST, 1990***Removal of nutritive salts from two Danish root zone systems*

Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 115-126 pages

**WINKERKORN, HANS F. ET HSAI-YANG FANG, 1975***Foundation engineering handbook*

Winkerkorn et Fang, 735 pages

**WINTER, MARGARITA ET REINHOLD KICKUTH, 1989***Elimination of sulphur compounds from wastewater by the root zone process-1. Performance of a large-scale purification plant at a textile Finishing Industry*

Water Ressources Vol.23 No.5, pp. 535-546 pages

**WINTER, MARGARITA ET REINHOLD KICKUTH, 1985***Elimination of nutrients (sulphur, phosphores, nitrogen) by the foot zone process and sinol tanexus degradation of organic watter*

the utrecht Plant Ecology News Report 4, pp.123-140 pages

**WINTER, MARGARITA ET REINHOLD KICKUTH, b***Elimination of sulphur compounds from wastewater by the foot zone process.**- II Mode of formation of sulphur deposits.*

Water Ressource. Vol.23 No.5, pp.547-560 pages

**WINTER, MARGARITA ET REINHOLD KICKUTH, a***Sulphur compounds-Their enviromental aspect and their eliminats from wastewater.*

Toxicological and Environemental Chemistry, pp. 507-514 pages

**WITTGREN, H. B., 1988***Removal of wastewater nitrogen in a wetland filter*

Linköping University, Recueil d'articles, 75 pages

- WITTGREN, H. B. ET KAREN SUNDBLAD, 1990 a**  
*Removal of wastewater nitrogen in an infiltration wetland with *Glyceria maxima**  
 Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 85-96 pages
- WITTGREN, H. B. ET KARIN SUNDBLAND, 1990 b**  
*Removal of waste water nitrogen in an infiltration wetland with *glyceria maxima**  
 Article de conférence, 12 pages
- WOLSTENHOLME, R. ET C.D. BAYES, 1990**  
*An evaluation of nutrient removal by the reed bed treatment system at Valleyfield, Fife, Scotland*  
 Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 139-148 pages
- WOLVERTON, B. C., 1990**  
*Aquatic Plant/Microbial Filters for Treating Septic Tank Effluent*  
 Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 173-178 pages
- WOLVERTON, B. C., 1983**  
*Method for treating wastewater using microorganisms and vascular aquatic plants*  
 Brevet Américain #4,415,450, 7 pages
- WOOD, A., 1990 b**  
*The application of artificial wetlands in South Africa*  
 Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 235-244 pages
- WOOD, A., 1990 a**  
*Constructed wetlands for wastewater treatment - engineering and design considerations*  
 Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 481-494 pages
- WOOD, A. ET L. C. HENSMAN, 1990 c**  
*Research to Develop Engineering Guidelines for Implementation of Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in Southern Africa*  
 Éd. Donald A. Hammer, Compte rendu de conférences: Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural, pp. 581-589 pages
- YOUNG, JAMES C., 1985**  
*Operating problems with wastewater filters*  
 Journal WPCF, volume 57, numéro 1, 22-29 pages
- ZHANG, T., J. B. ELLIS, D. M. REVITT ET ALL., 1990**  
*Metal uptake and associated pollution control by *Typha latifolia* in urban wetlands*  
 Pergamon Press, IAWPRC Conférence "Advances in water Pollution Control", pp. 451-460 pages

*Ministère du  
Développement durable,  
de l'Environnement  
et des Parcs*

Québec 

Centre de documentation

Document pdf numérisé à 300 ppi  
Reconnaissance optique de caractères  
Numériseur Minolta Di 470  
Adobe Acrobat 6.0