

Partenariat 2011 – Domaine Ecotechnologies et pollutions
Action 30 « Systèmes d'épuration dans les DOM »

Traitement des eaux usées domestiques par filtres plantés de macrophytes

**Adaptation de la filière au contexte
tropical : état de l'art**

Rapport final

Claire EME
Irstea

Mai 2012



- **AUTEURS**

Claire EME, Ingénieure d'études, Irstea, claire.eme@irtsea.fr

- **CORRESPONDANTS**

Onema : Stéphane GARNAUD, Direction de l'Action Scientifique et Technique,
stephane.garnaud@onema.fr

- **AUTRES CONTRIBUTEURS**

Pascal MOLLE, Irstea, pascal.molle@irstea.fr

Droits d'usage : Accès libre

Niveau géographique : National

Couverture géographique : Nationale

Niveau de lecture : Professionnels

• RESUME

Les filtres plantés de macrophytes sont aujourd'hui reconnus comme des procédés de traitement des eaux usées domestiques adaptés aux petites collectivités françaises de métropole. Le modèle français de filtres plantés à écoulement vertical a la particularité d'appliquer les eaux usées brutes sur le filtre s'affranchissant d'une étape préalable de traitement et permettant ainsi une gestion décennale des boues sur l'ensemble de la filière de traitement.

L'assainissement dans les DOM montre de nombreuses faiblesses. Le climat tropical peut induire des charges hydrauliques importantes lors des événements pluvieux et des effluents relativement septiques en entrée de station, mais aussi un vieillissement plus rapide de certains matériaux. De plus, l'éloignement géographique des DOM induit des coûts de transport parfois exorbitants pour les matériaux importés (équipements électromécaniques et réactifs notamment). Se pose ainsi la question du choix de la filière de traitement pour les petites collectivités des DOM et par le fait, de l'adaptabilité de la filière de traitement des eaux usées domestiques par filtres plantés de macrophytes au climat tropical.

En se basant sur les expérimentations tropicales de la littérature scientifique, les techniques de filtres plantés sont recensées. Il en ressort que de nombreux modèles de conception peuvent varier, autant dans la composition du massif filtrant que dans les charges organiques et hydrauliques appliquées au filtre. Malgré une hétérogénéité de la qualité des données, les rendements épuratoires présentés dans les expérimentations sont, pour la grande majorité, supérieurs à 60 % d'abattement pour les paramètres DBO₅, DCO et MES (80 % pour les filtres plantés à écoulement vertical). Cette observation met en évidence le fort potentiel d'adaptation de ces procédés et leur robustesse face aux variations de charges. Seules trois expériences relèvent de l'utilisation du modèle français.

Parallèlement, l'état des lieux des matériaux disponibles dans les DOM met en valeur un choix important de matériaux mais dont la qualité est médiocre avec un taux de fines relativement élevé. Une attention particulière est recommandée sur ce paramètre afin d'éviter les risques de colmatage. La problématique du végétal dans les DOM s'associe au risque d'invasions végétales. L'importation d'espèces végétales est exclue, l'utilisation d'espèces végétales autochtones étant recommandée. Malgré le vaste choix de macrophytes dans la littérature, les espèces végétales voisines de *Phragmites australis* seront préconisées ; le rôle mécanique du végétal dans le filtre planté type eaux usées brutes étant dominant.

• MOTS CLES

ASSAINISSEMENT, FILTRES PLANTES DE MACROPHYTES, TROPICAL, DOM, EAUX USEES DOMESTIQUES

CONSTRUCTED WETLANDS FOR DOMESTIC WASTEWATER TREATMENT: ADAPTATION TO FRENCH OVERSEAS DEPARTMENT TROPICAL WEATHER

• ABSTRACT

Constructed wetlands for domestic wastewater treatment is commonly used for French small communities. The “French model” of constructed wetland has been developed in order to treat raw sewage without pre-treatment, thus facilitating sludge management.

French overseas departments are governed by French laws and therefore their wastewater treatment plants must conform to French discharge policy. However, the tropical weather of those departments leads to high hydraulic loads and different effluent qualities. Furthermore, the actual wastewater plants show signs of age rapidly. Thus, adapting the design and operation of constructed wetlands to tropical climate and island specificities should allow to overcome these issues.

From international publications, constructed wetlands experiments in tropical weather are listed. Three “French models” are identified. Into all publications, a wide range of materials and macrophytes types are used under different loads. Despite the heterogeneity of collected data, the main results indicates almost 60 % BOD₅, COD and TSS removal (80 % for vertical flow). This points out that constructed wetlands are robust to design changes.

At the same time, local materials of French overseas departments are suitable but need to be washed before usage in order to limit clogging risks. Importation of macrophytes to those departments is excluded to limit invasion risks. Usage of native species is encouraged. Literature review identified several suitable species but the “French model” brings out a predominant mechanical role and cannot be compared to others constructed wetlands models.

• KEY WORDS

WASTE WATER TREATMENT, CONSTRUCTED WETLAND, TROPICS, FRENCH OVERSEAS DEPARTMENT, DOMESTIC WASTEWATER

- **SYNTHESE POUR L'ACTION OPERATIONNELLE**

- **CONTEXTE DE L'ETUDE**

L'assainissement dans les Départements d'Outre Mer (DOM) est confronté à de nombreuses spécificités locales. Pourtant, ces départements sont soumis aux exigences nationales et européennes et, dans le cadre de la Directive Eaux Résiduaire Urbaines, présentent de nombreuses non conformités. De plus, les installations de moins de 2 000 EH sont nombreuses dans les DOM et témoignent de dysfonctionnements réguliers. Malgré de lourds investissements engagés dans ces territoires, les objectifs de la Directive Cadre sur l'Eau ne seront que difficilement atteints dans les échéances prévues.

L'état des lieux des installations d'assainissement dans les DOM expose un vieillissement rapide des équipements électromécaniques et de fortes lacunes pour la mise en place de filière de traitement et valorisation des boues. Au vu de ces éléments et compte tenu de la faible capacité d'autofinancement des collectivités des DOM, la mise en place de filières de traitement peu coûteuses est préconisée pour faire face au développement rapide de ces collectivités. Les filtres plantés de macrophytes communément utilisés pour le traitement des eaux usées domestiques des petites collectivités métropolitaines sont ainsi proposés. Le modèle français permet l'application d'eaux usées brutes sur le filtre permettant une gestion décennale des boues tout en conservant la simplicité de gestion, propre à ce procédé. Ainsi dans le cadre d'une action Onema/Irstea, l'étude de l'adaptation des filtres plantés de macrophytes au contexte tropical est engagée pour préparer le transfert de cette technique aux spécificités locales des DOM. En partenariat avec les acteurs locaux de l'assainissement, des visites techniques se déroulent dans chacun des DOM afin d'accompagner cette démarche. En parallèle la présente étude s'attache à recenser les expériences de filtres plantés de la zone tropicale.

- **DONNEES ETUDIEES**

A partir des publications scientifiques internationales, est recensé un ensemble d'expérimentations concernant les filtres plantés de la zone tropicale. Sont ainsi distinguées, les procédés de filtres plantés à écoulement horizontal (FPh) des procédés de filtres plantés à écoulement vertical (FPv) et sont classés selon leur échelle d'expérimentations :

- Microcosme : pilote type colonne inférieur à 0,5 m² ;
- Mésocosme : pilote à taille réduite inférieur à 5 m² ;
- Macrocosme : pilote à taille réelle ou stations opérationnelles.

Nombre de publications considérées par échelle d'expérimentation

| Echelle | FPv | FPh |
|------------|-----|-----|
| Microcosme | 6 | 6 |
| Mésocosme | 5 | 15 |
| Macrocosme | 10 | 29 |
| Total | 21 | 52 |

Ont été exclues les expérimentations dont les données étaient incohérentes et les expérimentations FPv saturés et à flux ascendants.

Les données issues des publications sont très hétérogènes, et la qualité des mesures, autant dans les méthodes de prélèvements que d'analyses, sont variables. C'est pourquoi la comparaison de ces données est effectuée avec précautions.

En complément, les retours d'expérience des stations déjà présentes dans les DOM permettent de compléter cet état des lieux en apportant d'avantage de précisions sur la maintenance et l'entretien de ces systèmes dans ce contexte.

• RESULTATS TRANSPOSABLES

L'appréciation de la capacité d'adaptation de la technique de filtres plantés dans le contexte tropical s'est organisée selon trois problématiques :

- Problématique climatique ;
- Problématique de conception ;
- Problématique d'intégration.

La problématique climatique s'articule autour des surcharge hydrauliques induites par la forte intensité des précipitations et autour de l'absence d'hiver, caractéristiques du climat tropical.

Les fortes intensités de pluies n'ont pas d'impact direct sur le filtre, les charges hydrauliques appliquées quotidiennement au filtre étant plus de deux fois supérieures aux records annuels de précipitations journalières dans les DOM. Par ailleurs, des surcharges hydrauliques sont constatées dans les réseaux de collecte dues à des problèmes d'étanchéité de réseaux (regards et canalisations). Cette surcharge hydraulique potentiellement saisonnière devra être prise en compte dans le dimensionnement du système.

La littérature scientifique témoigne de l'impact négatif des températures hivernales sur les performances des filtres plantés en climat tempéré. La stabilité des températures dans le climat tropical renforce les capacités de traitement des filtres dans ce contexte. Une optimisation du dimensionnement des filtres est proposée et s'organisera pas à pas en compartimentant les filtres.

Malgré l'hétérogénéité des données recueillies et des modèles de conception, on constate une stabilité des performances des filtres pour les paramètres DBO₅, DCO et MES. Les éléments suivants permettent d'estimer les ordres de grandeur des caractéristiques des filtres de la littérature scientifique tropicale :

Caractéristiques générales des expérimentations considérées

| | Charge hydraulique | Concentration en entrée DCO | Concentration en sortie DCO | Abattement DCO | Charge spécifique DCO |
|-------------------|------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------|--------------------------|
| <i>unité</i> | <i>m³/j</i> | <i>mg/L</i> | <i>mg/L</i> | <i>%</i> | <i>g/m²/j</i> |
| FPv | | | | | |
| moyenne | 0,086 | 259 | 51 | 84 | 21 |
| écart type | 0,089 | 116 | 29 | 7 | 29 |
| FPh | | | | | |
| moyenne | 0,130 | 191 | 57 | 70 | 31 |
| écart type | 0,210 | 117 | 62 | 17 | 56 |

La problématique de conception s'intéresse à la disponibilité des matériaux dans les DOM et le choix de végétaux locaux. Les matériaux locaux sont propres à chaque DOM, disponibles en quantité pour les graviers mais plus rarement pour les sables. De plus, la qualité des matériaux est très variable, l'exigence de 3 % de fines dans les matériaux devra être respectée. *Phragmites australis* n'est pas présentes dans tous les DOM. Des espèces végétales de substitution devront être utilisées. Seront exclues toutes importations d'espèces végétales et l'utilisation d'espèces autochtones sera privilégiée. Des adaptations particulières devront être engagées pour éviter toute présence d'eaux stagnantes en surface sur l'installation afin de faire face aux éventuelles proliférations de moustiques. Les matériaux pour les canalisations devront être adaptés au contexte tropical (sensibilité du PVC aux UVs). Les équipements électromécaniques devront être protégés.

La problématique d'intégration vise à étudier l'accompagnement de l'implantation de ces systèmes dans les DOM et se base sur les retours d'expériences des stations existantes. Une attention particulière devra être maintenue lors de la phase de construction des filtres ainsi que lors de leur exploitation. Des formations du personnel exploitant sont conseillées.

• CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les résultats exposés ci-dessous permettent déjà d'établir quelques règles de dimensionnement pour les DOM :

- Prendre en compte les charges hydrauliques du réseau en saison humide pour le dimensionnement ;
- Privilégier les filtres plantés à un étage ;
- Rigueur dans le respect des 3 % de fines dans les matériaux ;
- Pas d'importation d'espèces végétales ;
- Utilisation privilégiée d'espèces végétales autochtones ;
- Vigilance lors de la phase de construction ;
- Formation du personnel exploitant par le constructeur à intégrer dans les projets ;
- Suivi expérimental des premières stations construites et à venir pour éditer un guide de dimensionnement adapté au climat tropical ;
- Fiabiliser la qualité des données expérimentales (laboratoires agréés).

Un suivi des stations de Mayotte et de Guyane est actuellement en cours afin de recueillir des données de terrain propres aux expérimentations tropicales du modèle français (eaux usées brutes). Parallèlement, l'accompagnement de projets de construction de nouvelles STEU par filtres plantés de macrophytes dans les DOM est proposé par l'équipe d'Irstea dans le cadre du renouvellement de l'action Systèmes d'épuration dans les DOM.

Cette étude s'est restreinte à l'étude des DOM, assujettis aux réglementations européennes et nationales mais peut s'adapter aux autres Collectivités d'Outre Mer dans ses aspects techniques.

SOMMAIRE

| | |
|--|-----------|
| Introduction..... | 12 |
| 1. DOM et assainissement | 12 |
| 1.1. Projet « Système d'épuration dans les DOM » | 12 |
| 1.2. Contexte de l'assainissement dans les DOM..... | 13 |
| 2. Place des filtres plantés | 18 |
| 2.1. Filtres plantés pour le traitement des eaux usées domestiques | 18 |
| 2.2. Problématique de l'adaptation des filtres plantés au contexte tropical..... | 23 |
| 3. Adaptation des filtres plantés en climat tropical..... | 25 |
| 3.1. Présentation de l'expérience tropicale | 25 |
| 3.2. Disponibilité des matériaux..... | 31 |
| 3.3. Choix des espèces végétales..... | 35 |
| 3.4. Performances épuratoires..... | 39 |
| 3.5. Conclusion et synthèse des manques | 51 |
| 4. Expérience des DOM et choix expérimentaux | 54 |
| 4.1. Démarrage des expérimentations, le cas de Mayotte..... | 54 |
| 4.3. Choix expérimentaux..... | 58 |
| 5. Conclusion..... | 60 |
| Bibliographie..... | 61 |
| Table des illustrations..... | 65 |
| Table des tableaux | 66 |
| Annexes..... | 67 |

GLOSSAIRE

Bâchées : volume déversé séquentiellement lors d'une période l'alimentation.

Boues : matières solides décantées qui se déposent au fond d'un décanteur ou d'une fosse toutes eaux. On qualifie également les dépôts qui s'accumulent sur les filtres plantées à écoulement vertical alimenté en eaux usées brutes.

Charge hydraulique : débit journalier reçu par la station sous forme de hauteur d'eau (exprimée en m^3/jour).

Charge organique : masse journalière de pollution reçue par la station (exprimée en kg/jour). La charge organique peut être calculée à partir de la DBO_5 ou de la DCO.

Equivalent Habitant : défini par la Directive Européenne Eaux Résiduaires Urbaine comme une charge journalière correspondant à 60 g de DBO_5 . Dans cette étude, un Equivalent Habitant correspond à une charge de pollution journalière de : 60 g de DBO_5 et 120 g de DCO avec 150 L d'eau consommée.

Eaux usées brutes : Eaux ménagères et eaux vannes issues d'une habitation domestique.

Fines : particules dont le diamètre est inférieur à 80 μm .

Géomembrane : membrane synthétique imperméable.

Géotextile : membrane synthétique perméable.

SIGLES & ABBREVIATIONS

ACV Analyse de Cycle de Vie

DBO₅ ou **DBO** Demande Biochimique en Oxygène à cinq jours, concentration exprimée en mg d'O₂/L

COM Collectivités d'Outre Mer

CU Coefficient d'Uniformité (d_{60}/d_{10})

d₁₀ diamètre de maille laissant passer 10 % de la masse de sable, en mm

d₆₀ diamètre de maille laissant passer 60 % de la masse de sable, en mm

DCE Directive Cadre sur l'Eau

DCO Demande Chimique en Oxygène, concentration exprimée en mg d'O₂/L

DDAF Direction Départementale de l'agriculture et de la Forêt

Directive ERU Directive Européenne sur les Eaux Résiduaire Urbaines

DOM Départements d'Outre Mer

EEE Espèce Exotique Envahissante

EH Equivalent Habitant

FPh Filtre Planté à écoulement Horizontal

FPv Filtre Planté à écoulement Vertical

HLR Hydraulic Loading Rate (Charge hydraulique spécifique en m/j)

H₂S Sulfure d'hydrogène ou Hydrogène sulfuré

INSEE Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques

Irstea Institut de Recherches en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture

MES Matières en Suspension, concentration exprimée en mg/L

NK Azote Kjeldahl, concentration exprimée en mg de N/L

N-NH₄ Azote Ammoniacal, concentration exprimée en mg de N/L

N-NO₂ Ions nitrites, concentration exprimée en mg de N/L

N-NO₃ Ions nitrates, concentration exprimée en mg de N/L

NGL Azote Global, concentration exprimée en mg de N/L

PIB Produit Intérieur Brut

P-PO₄ Ions phosphates, concentration exprimée en mg de P/L

Pt Phosphore Total, concentration exprimée en mg de P/L

SDAGE Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux

STEU Station de Traitement des Eaux Usées

O₂ Dioxygène

ONEMA Office National de l'eau et des Milieux aquatiques

WHO World Health Organization

TRAITEMENT DES EAUX USEES DOMESTIQUES PAR FILTRES PLANTES DE MACROPHYTES – ADAPTATION AU CONTEXTE TROPICAL DES DOM : ETAT DE L'ART

Introduction

La filière de traitement des eaux usées domestiques par filtres plantés de macrophytes s'est développée dans les années 70 avec les travaux du Dr Seidel en Allemagne. Depuis, de nombreuses adaptations ont vu le jour. En France, dès la fin des années 80, les expérimentations se sont portées sur l'application d'eaux usées brutes sur les filtres permettant ainsi au procédé de s'affranchir d'une étape de traitement préalable et par le fait de tendre vers une gestion des boues considérablement simplifiée. Cette technique aujourd'hui répandue dans les petites collectivités de métropole bénéficie de très bons retours d'expérience autant sur les performances du système que pour son coût d'investissement et de fonctionnement comparé aux autres procédés.

Cette étude tend à s'intéresser au transfert de cette technique dans le contexte tropical des Départements d'Outre Mer français, ces derniers étant soumis aux mêmes réglementations nationales et européennes que les départements métropolitains.

Dans une première partie, on s'intéressera au contexte spécifique des Départements d'Outre Mer (DOM) et plus particulièrement à la problématique assainissement dans ces territoires. On abordera ainsi les contraintes auxquelles sont soumis ces départements et l'enjeu que représentent les petites stations de traitement des eaux usées (STEU) dans les DOM. Dans une seconde partie seront brièvement présentées les techniques de filtres plantés à macrophytes pour aborder les problématiques associées au transfert de ces techniques dans le climat tropical. La troisième partie s'attachera à présenter les expériences scientifiques de la zone tropicale en s'intéressant particulièrement aux problématiques décrites préalablement afin de dégager de cette étude un ensemble de choix expérimentaux, présentés en dernière partie, applicables aux unités pilotes et stations expérimentales prévues ou déjà construites dans les DOM.

1. DOM et assainissement

1.1. Projet « Système d'épuration dans les DOM »

1.1.1. Action 30 « Adaptation des méthodes aux spécificités d'Outre Mer »

Face à la nécessité de développer des installations d'assainissement traitant une charge polluante brute inférieure à 120 kg DBO₅/j dans les DOM, Irstea est, dans le cadre d'une convention Onema, en charge d'étudier l'adaptabilité de la filière de traitement des eaux usées domestiques par les filtres plantés au contexte tropical des DOM.

Le travail engagé au travers de cette action s'est développé sous différents volets :

- un volet terrain avec des visites techniques et rencontres des acteurs locaux de l'assainissement dans chacun des territoires afin de mieux appréhender les réalités de terrain, d'aborder le contexte local et de renforcer les échanges entre les acteurs métropolitains et DOM ;
- un volet théorique présenté ci-dessous qui s'attache à présenter le contexte des DOM, les techniques de filtres plantés et l'expérience internationale en climat tropical.

1.1.2. Départements d'Outre Mer

Les DOM sont des territoires ultra-marins appartenant à la catégorie des collectivités territoriales. Chacun de ces départements a également le statut de région française, dite région d'Outre-mer. On dénombre 5 DOM intégrant **la Guadeloupe, la Guyane, la Martinique, La Réunion** et depuis le 31 mars 2011, **Mayotte** (Figure 1).

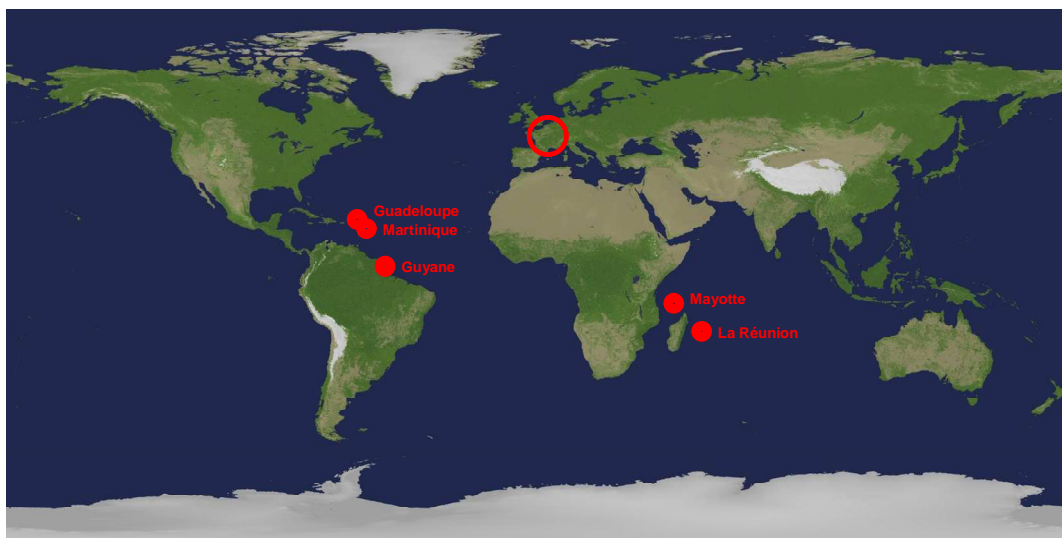


Figure 1 : DOM français dans le monde

D'un point de vue juridique, les DOM sont constitutifs du territoire national français et donc à ce titre de l'Union Européenne mais, comme le reste de l'Outre-mer, les DOM ne font pas partie de l'espace Schengen.

Ils se caractérisent par de nombreux critères socio-environnementaux présentant chacun un contexte particulier (Richez, 2011). Se distingue nettement le contexte insulaire et très peuplé des îles tropicales, du contexte guyanais continental et faiblement peuplé (Tableau 1).

Tableau 1 : Population, superficie et densité de population dans les DOM (INSEE janvier 2011)

| Données INSEE | Population (hab) | Population (%) | Superficie (km²) | Superficie (%) | Densité (hab/km²) | Evolution démographique à l'horizon 2030 |
|----------------------|------------------|----------------|------------------|----------------|-------------------|--|
| Population française | 63 961 859 | 100,0% | 632759 | 100% | 101 | 5,1% |
| Martinique | 397 693 | 0,6% | 1128 | 0,2% | 353 | 7,4% |
| Guadeloupe | 401 784 | 0,6% | 1628 | 0,3% | 247 | 36,4% |
| La Réunion | 808 250 | 1,3% | 2504 | 0,4% | 323 | 26,9% |
| Guyane | 219 266 | 0,3% | 83533 | 13,2% | 3 | 56,0% |
| Mayotte | 186 452 | 0,3% | 374 | 0,1% | 499 | 97,0% |
| Total DOM | 2 013 445 | 3,1% | 89167 | 14,1% | - | - |

Par ailleurs, les DOM partagent des caractéristiques communes qui les distinguent des autres départements français. On dénotera **les caractéristiques naturelles** dont leur éloignement géographique, leur climat chaud et humide avec une exposition aux risques naturels souvent forte (séismes, cyclones, glissements de terrain, éruptions volcaniques, ...) et une topographie souvent très marquée due à une histoire géologique récente. Un point commun fort est la **démographie galopante** des DOM avec une progression de la population largement supérieure aux autres départements français.

1.2. Contexte de l'assainissement dans les DOM

1.2.1. Etat des lieux de l'assainissement des DOM

1.2.1.1. Démographie et assainissement

Les DOM se distinguent des départements métropolitains par de nombreux aspects pouvant affecter le bon développement de l'assainissement de ces territoires. Outre les facteurs naturels, la forte croissance démographique de ces territoires induit un développement rapide mais aussi mal contrôlé du tissu urbain compliquant les choix techniques et l'organisation des services d'assainissement.

1.2.1.2. Difficultés techniques

Parallèlement, l'adaptation des techniques d'assainissement autant pour la gestion du réseau de collecte (formation d'H₂S, corrosion) que pour les ouvrages de traitement eau ou boues (performances, vieillissement des installations, maintenance) n'est que rarement prise en compte et les retours d'expérience non mis en commun. On constate également de fortes lacunes dans la mise en œuvre de l'auto surveillance des installations et le manque de laboratoires d'analyses agréés dans ces territoires soutient ces imprécisions.

1.2.1.3. Difficultés financières

Le contexte économique des DOM est également particulier avec des revenus globalement inférieurs à la moyenne métropolitaine (avec un PIB/hab. d'environ 5 000 à 19 000 € dans les DOM contre 28 700 € en métropole) et un taux de chômage élevé (de 20 à 26 % dans les DOM contre 7.8 % en métropole en 2008).

En terme d'assainissement, les DOM ont des besoins de financements considérables mais la capacité d'autofinancement des collectivités en charge de l'assainissement est généralement très faible. Cette faible capacité d'investissement est essentiellement due à un nombre d'infrastructures en place réduit, un faible taux de raccordement, un taux d'impayés important, mais surtout une mise en place des redevances assainissement tardive et à un taux faible. Il faut également noter que la séparation des budgets eau et assainissement n'est pas toujours effective dans les collectivités. Pourtant, l'assainissement est pointé comme un enjeu majoritaire pour la préservation de la qualité de la ressource en eau et, à ce titre fait partie de l'ensemble des SDAGE des ces territoires.

1.2.1.4. Organisation difficile

Une donnée commune à l'ensemble des DOM est la difficulté d'organiser la gestion des déchets issus de l'assainissement (refus de dégrillage, graisses, boues et matières de vidange) à l'échelle de leur territoire. Faute de solution pertinente, l'accueil des boues de STEU se fait majoritairement au moyen de dérogation réglementaire, au sein des centres d'enfouissement des déchets qui, en plus d'accueillir ces matières de manière exceptionnelle arrivent pour la plupart à saturation. Ces sites sont ainsi menacés de fermeture. Parallèlement, le dépotage de matières de vidange en entrée de STEU provoque des dysfonctionnements des filières de traitement non dimensionnées pour cet accueil ; des déversements sauvages de ces matières dans le réseau de collecte est, par ailleurs, suspecté. Par le fait et au vu des retards des DOM dans la mise en œuvre des directives communautaires (DCE et ERU majoritairement), de nombreux financements sont investis pour la mise en conformité des plus grosses agglomérations d'assainissement (Richez, 2011)

1.2.2. Petites collectivités et DOM

1.2.2.1. Contexte des petites collectivités

Le contexte des petites stations de traitement en métropole est couramment désigné par le terme de « petites collectivités » relatif aux petites communes et hameaux des milieux ruraux métropolitains (contexte réglementaire des petites collectivités en Annexe 1). Ces petites communes, en plus d'être isolées, ne disposent que de faibles budgets assainissement et que trop rarement de personnels qualifiés. Le choix de la filière de traitement doit s'adapter à ces contraintes.

Cependant, le milieu insulaire tropical et accidenté de la majorité des DOM se distingue du contexte de milieu rural des petites collectivités métropolitaines. Les petites installations de traitement recensées dans les îles sont, pour la plupart, des dispositifs de traitement associés à :

- des petites communes et/ou quartiers isolés dû à une topographie marquée ;
- des lotissements privés dû à une urbanisation rapide et mal contrôlée.

1.2.2.2. Cas des DOM

Les installations de traitement des eaux usées domestiques inférieures à 2 000 EH, qualifiées de petites installations, ne sont que rarement prises en compte. Trop mal connues des services en charge

de l'assainissement, elles présentent le plus souvent des dysfonctionnements dus à un manque de maintenance comme en témoignent les extraits suivants (Figure 2).

« Beaucoup de « mini-stations » de lotissement, plus ou moins bien conçues, fonctionnant mal, ne sont gérées ni par ceux qui y sont raccordés ni par la collectivité, car elles sont dans le domaine privé : il faut étudier au cas par cas la possibilité de les confier à l'exploitant, à condition que les abonnés raccordés soient assujettis à la taxe d'assainissement, ou de les supprimer au profit du raccordement au réseau général. »

(Audit sur l'Eau Martinique, 2010)

« Il est recensé 62 systèmes [d'assainissement semi-collectif privé] pour 6.800 équivalents habitants. Ces systèmes fonctionnent souvent mal car pas entretenus. Ils sont en grande partie à réhabiliter. »

(Plan d'actions Assainissement Mayotte DDAF)

« De nombreuses micros et mini stations d'épuration : La Guadeloupe compte beaucoup de micro-stations d'épuration : près de 300 mini-stations sont recensées sur l'archipel (représentant une capacité totale de 58 000 EH). Ces dispositifs, de par leur mauvais dimensionnement et/ou entretien, créent des pollutions importantes générant des problèmes de salubrité publique (transmission de pathologies infectieuses par contact avec des eaux insuffisamment traitées) et environnementaux. Il existe un manque de contrôles de ce type d'installations (nombreuses sont celles qui ne fonctionnent plus depuis des années). »

(SDAGE 2010-2015, Comité de bassin de la Guadeloupe)

Mais au delà des questions de gestion publique ou privée des installations d'assainissement des petites collectivités (réglementation, responsabilité), demeure fondamentalement la question de l'adaptation technique des filières de traitement développées en métropole pour le climat tempéré. Sont ainsi assujettis à ces questions, un certain nombre de procédés extensifs et intensifs. Au vu du contexte exposé ci-dessus et à la demande de l'Onema, il convient de s'intéresser à la filière de traitement par filtres plantés de macrophytes présentée ci-après.



Figure 2 : Cas de STEU à l'abandon (Le Lamentin, Guadeloupe)

1.2.2.3. Comparaison aux autres procédés des petites collectivités

Un grand nombre de procédés de traitement des eaux usées domestiques est disponible sur le marché. On distingue ces procédés à partir de différents critères :

- les objectifs de qualité fixés ;
- l'emprise au sol ;
- la maintenance nécessaire au bon fonctionnement du procédé ;
- l'énergie consommée ;
- les réactifs nécessaires ;
- le volume de sous-produits produit ;
- le personnel nécessaire ;
- le coût de l'installation ;
- le coût de fonctionnement pour la collectivité ;
- la robustesse du système, ...

Certaines classifications s'intéressent à organiser les procédés de traitement selon leur emprise au sol et leur technicité (Figure 3).

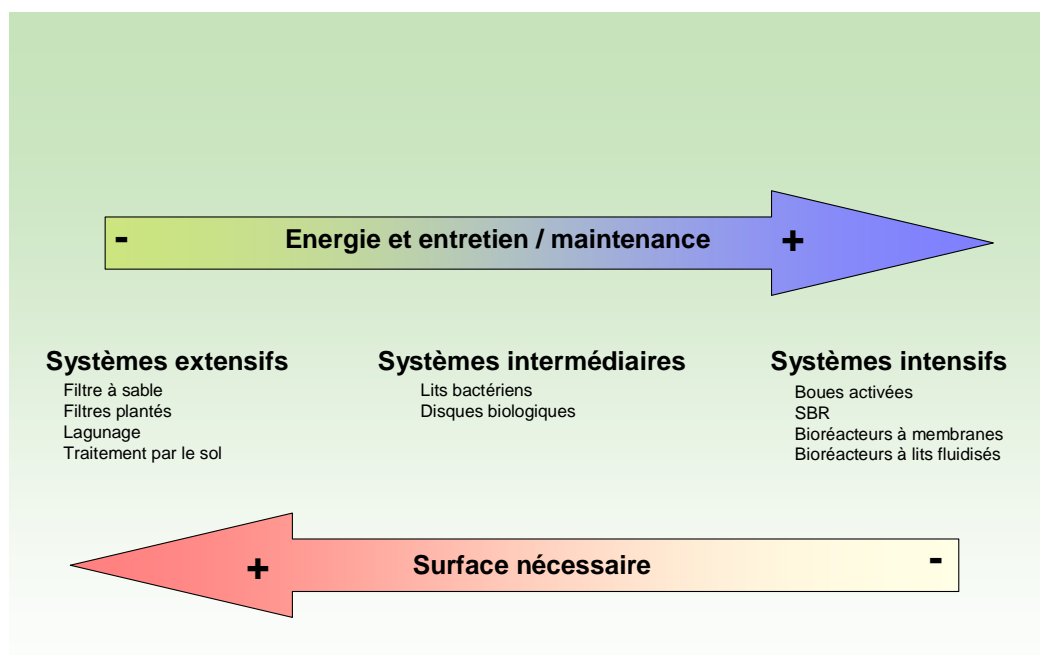


Figure 3 : Systèmes extensifs vs. Intensifs

Les contraintes principales des petites collectivités sont les financements, la disponibilité du personnel qualifié et la gestion des boues. Dans ce contexte, force est de constater que les procédés de traitement intensifs et intermédiaires, certes plus compacts, génèrent aussi une forte production de boues et nécessitent une grande quantité d'énergie pour fonctionner. Présentant toutefois de très bonnes performances épuratoires, ils induisent de lourds investissements pour leur installation, maintenance et entretien. Ces dispositifs sont, pour ces raisons, souvent considérés comme inadaptés pour les petites collectivités (Brissaud, 2007; Kivaisi, 2001; Sundaravadivel et Vigneswaran, 2003).

Les procédés extensifs (lagunage, filtres plantés, infiltration-percolation) bénéficient d'une gestion plus simple avec une faible demande énergétique. Cependant, les retours d'expérience sur les installations d'infiltration-percolation, plus généralement appelés filtres à sable, montrent une grande sensibilité de ces systèmes au colmatage ce qui limite leur utilisation. Le lagunage naturel, quant à lui, comporte des inconvénients en termes d'emprise au sol (11 m²/EH en France métropolitaine) et présentent un risque de prolifération de moustiques pour le contexte tropical (Dale *et al.*, 2007; Dale et Knight, 2008; Diemont, 2006; Knight *et al.*, 2003).

Les procédés plus compacts tels que les disques biologiques et les lits bactériens peuvent aussi trouver une place intéressante dans l'assainissement des petites collectivités des DOM. En revanche, ils présentent une consommation énergétique plus importante et nécessitent du personnel qualifié pour une maintenance plus complexe ainsi qu'une production de boues à gérer régulièrement.

Il faut ajouter que dans le contexte des DOM, où seules de très rares filières de traitement et de valorisation des boues sont mises en place, on constate un vieillissement rapide des appareils électromécaniques. De plus, l'éloignement géographique suggère un coût de transport important pour l'importation de matériel ainsi que pour leur maintenance et réparations.

En complément, une comparaison de l'impact environnemental par ACV (Analyse de Cycle de Vie) des procédés extensifs (traitement par le sol et filtres plantés) et boues activées pour le traitement des effluents de petites collectivités (inférieures à 2 000 EH) montre la pertinence des filières de traitement extensives dans ce contexte (Yildirim and Topkaya, 2012). Les critères étudiés sont : l'emprise au sol, la consommation en énergie, les matériaux bruts utilisés et les émissions de gaz sur l'ensemble de la durée de vie de l'installation.

Face à ce constat, la filière de filtres plantés apparaît comme attractive avec une emprise au sol réduite par rapport au lagunage naturel, une gestion aisée, l'utilisation de matériaux locaux et un fonctionnement à faible demande énergétique. En revanche, des interrogations subsistent sur l'adaptation de la filière française en climat tropical aussi bien liées à son dimensionnement, sa conception qu'à sa gestion (Figure 4).



Figure 4 : Exemple de filtre planté, Roussillon (84) 1 350 EH

2. Place des filtres plantés

2.1. Filtres plantés pour le traitement des eaux usées domestiques

2.1.1. Filtres plantés

Les techniques de traitement des eaux usées domestiques par filtres plantés de macrophytes regroupent un ensemble de procédés parmi lesquels on distingue les filtres plantés à écoulement horizontal, FPh des filtres plantés à écoulement vertical, FPv. D'un point de vue général, les avantages et inconvénients ainsi que leurs applications sont présentées ci-dessous.

2.1.1.1. Avantages / Inconvénients

Par approche globale, la filière de traitement des eaux usées domestiques par filtres plantés comporte les avantages suivants :

- Faible coût d'exploitation ;
- Performances de traitement élevées et stables ;
- Possibilité d'utiliser des matériaux locaux ;
- Faible demande énergétique ;
- Pas d'adjuvants chimiques ;
- Facilité de gestion, notamment des boues pour la filière à écoulement vertical ;
- Acceptation de surcharges hydrauliques et organiques pour la filière à écoulement vertical ;
- Intégration paysagère.

En revanche, les inconvénients les plus souvent cités sont :

- Emprise au sol importante ;
- Rigueur de réalisation ;
- Maintenance et exploitation souple mais incontournable ;
- Traitement limité du phosphore ;
- Traitement limité des pathogènes.

2.1.1.2. Applications

Les filtres plantés sont généralement utilisés pour le traitement secondaire des eaux usées domestiques mais aussi pour le traitement tertiaire. Seule la filière de traitement par FPv, appelée filière française, traite les eaux usées domestiques brutes.

Les filtres plantés présentent de nombreuses applications dont le traitement :

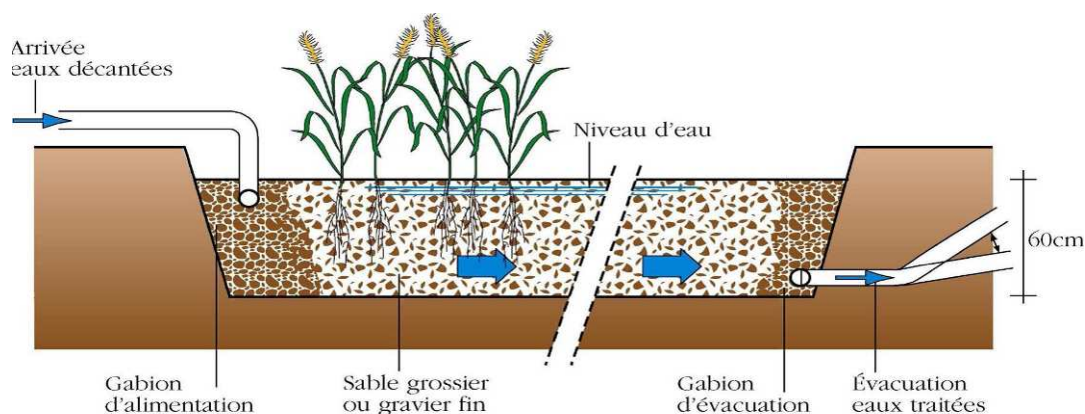
- secondaire des eaux usées domestiques ;
- tertiaire des eaux usées domestiques ;
- des eaux issues de déversoirs d'orage ;
- combiné tertiaire et eaux de déversoirs d'orage ;
- des rejets associés aux activités minières ;
- des lixiviats de décharge ;
- des effluents industriels ;
- des eaux strictement pluviales ;
- des eaux de ruissèlement routier ;
- des eaux de ruissèlement agricole.

2.1.2. Filtre planté à écoulement horizontal

Le filtre planté à écoulement horizontal, FPh, est un procédé d'épuration secondaire ou tertiaire et doit obligatoirement être associé et au minimum à un traitement primaire en amont.

2.1.2.1. Présentation

Le principe du filtre planté à écoulement horizontal (FPh) est de faire circuler l'effluent à travers un massif filtrant composé d'un matériau saturé en eau et planté de macrophytes. Les mécanismes de dégradation biologique prennent place dans un milieu constitué de juxtaposition de zones aérobies (proches des rhizomes) et anoxiques. La limitation en oxygène de ce type d'ouvrage induit la nécessité de temps de séjour plus conséquents pour la dégradation de la matière carbonée et une nitrification généralement partielle (Figure 5).



Agence de l'Eau RMC, 1999

Figure 5 : FPh - Filtre planté à écoulement horizontal, schéma de principe

La conception des FPh peut varier selon les paramètres suivants :

- le matériau du massif filtrant ;
- le niveau d'eau dans le filtre ;
- le mode d'alimentation du filtre (continue, par bâchées contrôlées, fil de l'eau) ;
- les charges appliquées ;
- les ou l'espèce végétale plantée.

L'inconvénient de ce système est sa **sensibilité au colmatage**. Le choix des matériaux, les charges appliquées tout comme le procédé de traitement en amont sont en majorité responsables du colmatage (Knowles *et al.*, 2011).

2.1.2.2. Dimensionnement

Le dimensionnement des FPh est toujours en discussion dans le domaine de la recherche scientifique. Le plus classique vise à coupler une approche hydraulique du système (Loi de Darcy) avec une approche cinétique (cinétique de réactions de premier ordre du type $k-C^*$) (R. H. Kadlec and Knight, 1996). Cependant, cette approche reste très imparfaite et présente des variations importantes des constantes de dégradation. Pour cette raison, de nouvelles recherches sont toujours en cours afin de déterminer une approche plus précise par modélisation dynamique.

En pratique, des guides de dimensionnement se sont développés à partir des expérimentations existantes et ce, pour favoriser le développement de la filière par les constructeurs (Tableau 2).

Tableau 2 : Exemples de critères de dimensionnement pour les FPh (adapté de Vymazal and Kröpfelová, 2008)

| Pays | Surface spécifique [m²/EH] | Commentaires | Source |
|--------------------|----------------------------|--|--|
| Allemagne | 5 | pour une surface minimum de 20 m² | ATV-A 262 (1998) |
| Autriche | 6 | pour un objectif de dégradation organique avec 11,2g DBO ₅ /m²/j max | ÖNORM 2005 (2005) |
| Belgique | > 3 | | VMM (2002) |
| Danemark | 5 | pour une surface minimum de 25 m² | Ministry of Environment (1999) |
| Espagne | > 10 | pour une concentration en entrée en DBO ₅ < 250 mg/l avec 6g DBO ₅ /m²/j max | Garcia et Corso (2007) Garcia et al. (2004) |
| Etats-Unis | 10 | pour un objectif de 30 mg/l en DBO ₅ : 6g DBO ₅ /m²/j pour un objectif de 20 mg/l en DBO ₅ : 1,6g DBO ₅ /m²/j | US EPA (2000) |
| Etats-Unis | 7,5 | pour un objectif de 30 mg/l en DBO ₅ : 8g DBO ₅ /m²/j pour un objectif de 5 mg/l en DBO ₅ : 4g DBO ₅ /m²/j | Wallace et Knight (2006) |
| Italie | 4 - 6 | < 2 000 EH pour un traitement approprié | Pucci et al.(2004) |
| République tchèque | 5 | pour un objectif de dégradation en DBO ₅ et MES avec 10g DBO ₅ /m²/j max | CSN 75 6402 (1998) |
| Royaume-Uni | 5 | traitement secondaire | Cooper et al. (1996) |
| Royaume-Uni | 0,5 - 1 | traitement tertiaire | Cooper et al. (1996) |

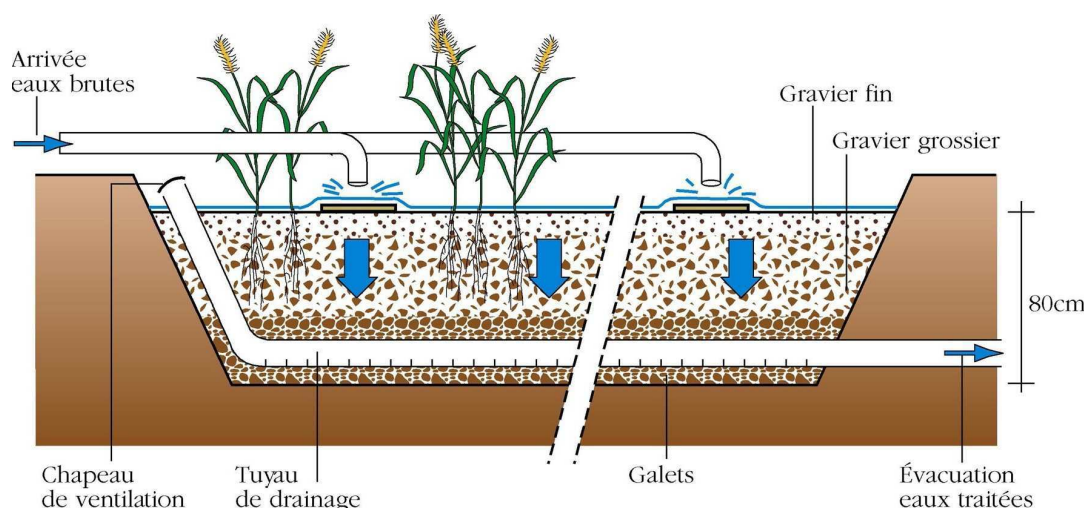
avec 1EH, 60g DBO₅/j

2.1.3. Filtre planté à écoulement vertical

2.1.3.1. Présentation générale

Le manque d'oxygénation des FPh limitant les dégradations aérobies (nitrification, oxydation de la matière organique) a conduit au développement des filtres plantés à écoulement vertical, FPv (Figure 6).

Le principe des FPv est d'améliorer l'oxygénation passive du filtre par une application homogène de l'effluent en surface du filtre favorisant la percolation de l'effluent dans un massif filtrant composé d'une succession de couches de filtration, transition et de drainage. L'effluent est ainsi collecté par un réseau de drains en fond de filtre.



Agence de l'Eau RMC 1999

Figure 6 : FPv - Filtre planté à écoulement vertical, schéma de principe

Les FPv sont plantés de macrophytes, cependant les espèces végétales utilisées peuvent varier de celles utilisées dans les FPh, l'un fonctionnant en conditions saturées l'autre en condition non saturées.

Depuis l'arrivée des premiers FPv, différentes adaptations techniques ont vu le jour. La filière française détaillée ci-dessous présente la particularité d'appliquer les effluents bruts (sans prétraitement) sur le filtre.

2.1.3.2. Cas de la filière française, eaux usées brutes

La filière de traitement des eaux usées brutes par FPv a été développée par les équipes d'Irstea (anciennement Cemagref) en France dans les années 80. Elle permet l'application d'eaux usées brutes sur le filtre et comporte actuellement différentes variantes selon les objectifs de rejet fixés.

Elle est le seul procédé de traitement des eaux usées domestiques qui propose une technique capable de traiter conjointement les eaux et les boues.

La filière classique (Figure 7) présente un dimensionnement à deux étages de filtres développée avec 3 FPv en parallèles au premier étage composés de matériaux grossiers puis 2 FPv au deuxième étage constitués de sables, alimentés par des cycles de 3,5 jours d'alimentation pour 7 jours de repos (Molle *et al.*, 2005a).

Afin de favoriser la répartition de l'effluent sur la surface du filtre, l'alimentation s'effectue par bâchées. L'application d'eaux usées brutes induit la formation d'une croûte en surface de filtre percée par les végétaux. Les mesures actuelles témoignent d'une accumulation de boues en surface de 1,5 cm/an.

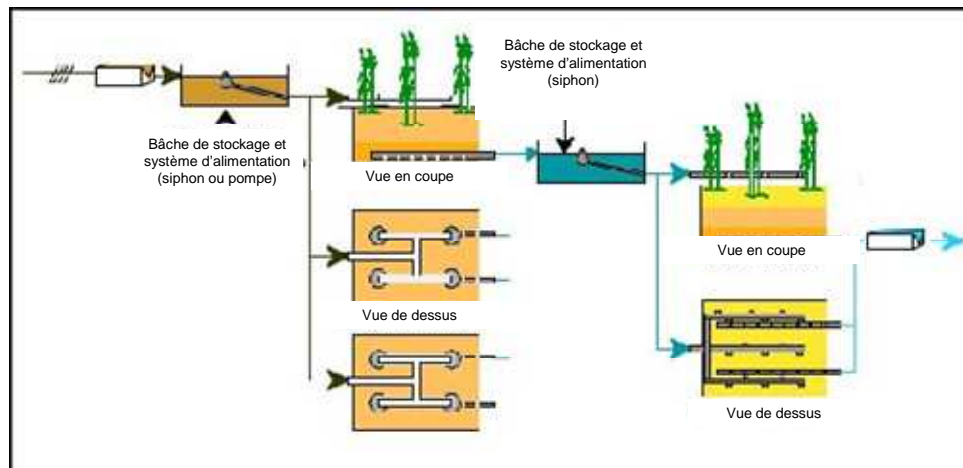


Figure 7 : FPv eaux usées domestiques brutes, schéma de principe de la filière développée par Irstea

D'autres configurations permettant de répondre aux objectifs azotés sont également développées en intégrant un étage de filtration par FPh par exemple. Cette disposition appartient aux systèmes hybrides, décrits dans le paragraphe suivant.

2.1.3.3. Dimensionnement

Le dimensionnement des FPv varie selon les caractéristiques du système :

- matériaux du filtre ;
- charge hydraulique appliquée ;
- système de distribution ;
- charges organiques appliquées ;
- système d'aération ;
- gestion des cycles alimentation repos ;
- ...

Comme le dimensionnement des FPh, le dimensionnement des FPv est sujet à de nombreuses recherches. Cependant, la modélisation des conditions insaturées des FPv s'avère plus complexe et ne permet pas encore l'établissement de modèles prédictifs fiables. Le dimensionnement des PFv est ainsi basé sur des modèles empiriques.

La filière classique française à deux étages de FPv est dimensionnée pour recevoir environ 40 g DBO₅/m²/j pour l'ensemble des filtres du premier étage (soit 1,2 m²/EH) tandis que le deuxième étage est dimensionné selon la perméabilité du sable et correspond généralement à 0,8 m²/EH. Le dimensionnement total de la filière classique à deux étages de FPv est de 2 m²/EH (Molle *et al.*, 2005a).

Le Tableau 3 présente différents dimensionnements de FPv disponibles dans la littérature pour le traitement des eaux usées domestiques avec des objectifs de dégradation de la matière organique et nitrification.

Tableau 3 : Comparaison des surfaces nécessaires (m²/EH) pour le dimensionnement de FPv à partir de formules empiriques de la littérature

| Auteurs | Surface spécifique [m ² /EH] | |
|-------------------------------|---|------------|
| | pour 4 EH | pour 50 EH |
| Grant, 1995 | 2 | 0,88 |
| Grant et Grlggs, 2001 | 3 | 1,31 |
| Cooper et al, 1996 | 2 | 2 |
| Weedon, 2001, 2003 | 3,2 | 1,33 |
| Platzer, 1999 | 0,3 | 0,3 |
| Brix et al., 2002; Brix, 2003 | 0,9 | 1,5 |
| Boutin et Liénard, 2003 | 2,5 | 2,5 |
| Molle, 2005 | 2 | 2 |
| Cooper et Cooper, 2005 | 2,5 | 2,5 |
| Brix et Johansen, 2004 | 3 | 3 |
| Langergraber, 2006 | 4 | 4 |

Filière eaux usées brutes française

2.1.4. Variantes de conception

Les procédés de traitement des eaux usées domestiques par filtres plantés permettent un abattement de la matière organique et matières en suspension très intéressant et stable dans le temps pour la grande majorité des conceptions (R.H. Kadlec and Wallace, 2009).

Pour le traitement de l'azote, les FPh sont favorables à la dénitrification, tandis que les FPv catalysent la nitrification (García *et al.*, 2010).

Le traitement du phosphore n'est pas actuellement suffisant pour atteindre les objectifs de qualité autant pour le traitement par FPh que par FPv et hybrides. Les recherches en cours s'intéressent préférentiellement aux mécanismes d'adsorption du phosphore sur des matériaux spécifiques (Drizo *et al.*, 2006; Mateus *et al.*, 2012; Molle *et al.*, 2003a; Stefanakis et Tsihrintzis, 2012). Parmi les matériaux susceptibles de retenir le phosphore, on peut citer ceux contenant des hydroxydes de fer, d'aluminium et/ou du calcium, trois éléments réagissant fortement avec le phosphore.

A partir de ces observations et dans le but de limiter l'emprise au sol et/ou d'améliorer le traitement de l'azote, des systèmes hybrides se sont développés. Les plus communs sont issus de la **combinaison des procédés FPh-FPv et FPv-FPh** (Abidi *et al.*, 2009; Kantawanichkul and Somprasert, 2005; Laber *et al.*, 1999; Lloréns *et al.*, 2011; Melián *et al.*, 2010; Molle *et al.*, 2006; Tunçsiper, 2009; Tunçsiper *et al.*, 2009; Vymazal and Kröpfelová, 2011) avec des possibilités de recirculation (Arias *et al.*, 2005) de l'effluent (Ayaz *et al.*, 2012).

2.2. Problématique de l'adaptation des filtres plantés au contexte tropical

Le transfert des technologies de traitement par filtres plantés au climat tropical soulève de nombreuses problématiques (Figure 8).

2.2.1. Problématique climatique

En premier lieu, le **climat chaud et humide** associé à la zone tropicale semble favorable à l'activité biologique et à l'activité végétale mais son effet sur les rendements épuratoires du système sont mal connus dans la pratique. A ce titre, l'optimisation de l'emprise au sol grâce à des cinétiques biologiques plus rapides et une perte d'eau par évapotranspiration plus importante est une inconnue pour les futurs dimensionnements. On peut également considérer un risque de colmatage du système par un développement racinaire trop important. Le choix du végétal sera donc aussi lié à son développement racinaire.

L'effet des **fortes précipitations** sur l'hydraulique du système est également à prendre en compte tout autant que le phénomène de ruissellement lors de ces épisodes pluvieux. Des charges plus importantes en matières en suspension sont prévisibles et devront être prise en compte dans la conception de la filière.

2.2.2. Problématique de conception

L'enjeu de la **disponibilité des matériaux** est également très important : les matériaux volcaniques des îles tropicales semblent propices à la filtration mais sont-ils disponibles en quantité et surtout en qualité dans chacun des territoires ? Une attention particulière sera portée sur le sable utilisé en deuxième étage de traitement à écoulement vertical (Cf. chapitre 3.2.1) dont les critères de sélection sont relativement stricts. Les caractéristiques des matériaux disponibles conditionneront la conception de la filière.

Phragmites australis est l'**espèce végétale** préférentiellement utilisée pour les filtres plantés en Europe. Cependant, elle est considérée comme invasive dans de nombreuses régions de la zone tropicale dont certains DOM. Les îles tropicales sont aussi des territoires particulièrement sensibles aux invasions végétales. De nouvelles espèces végétales sont ainsi à considérer.

De nombreuses maladies sont présentes dans la zone tropicale et véhiculées, entre autres, par les moustiques (dengue, malaria, Chikungunya, ...). L'intégration de filtres plantés ne doit en aucun cas favoriser la **prolifération de moustiques**. Une vigilance et un suivi particulier doit être engagé pour éviter toute zone stagnante dans la conception des filières de traitement.

2.2.3. Problématique d'intégration

La technique de traitement des eaux usées domestiques par filtres plantés est une technique récente qui nécessite une **exploitation particulière** comparé aux procédés traditionnellement utilisés. Une formation du personnel en charge de ces ouvrages est nécessaire et doit être conduite avec rigueur et attention.

Le développement de cette technique, jugée éco-innovante, est contraint par son **acceptation** par les services en charge de l'assainissement tout comme par la population environnante mais aussi par les entrepreneurs locaux. Une présentation détaillée des techniques ainsi que l'utilisation de sites pilotes tendent à favoriser le développement de cette technique.

Par ailleurs, certains **contextes culturels** appréhendent la gestion des effluents domestiques différemment. Une prise en compte de ce contexte améliore la gestion des ouvrages (entretien maintenu, limitation des vols, ...).

En se basant sur les expériences acquises dans les pays de la zone tropicale, chacune de ces problématiques sera abordée de manière à appréhender le plus précisément l'adaptation technique de ce procédé.

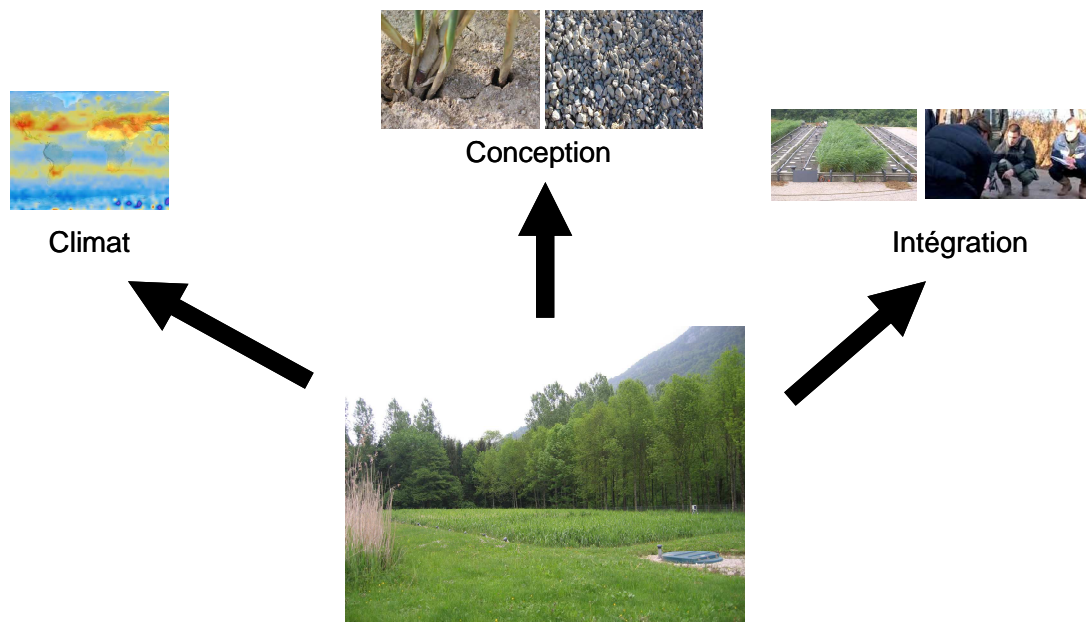


Figure 8 : Problématique de l'adaptation des filtres plantés au contexte tropical

3. Adaptation des filtres plantés en climat tropical

3.1. Présentation de l'expérience tropicale

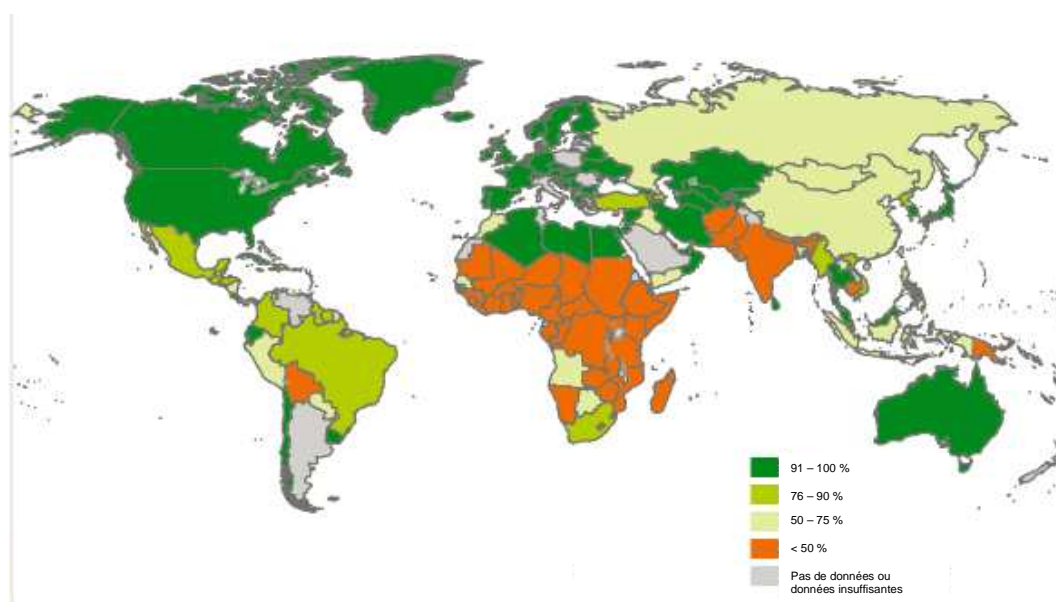
3.1.1. Pays en voie de développement et pays émergents

Les expériences de filtres plantés pour le traitement des eaux usées domestiques sous climat tropical s'associent au contexte des pays en voie de développement et pays émergents majoritairement constitutifs de la zone tropicale. Le contexte de l'assainissement dans ces pays est différent du contexte français. Ci-dessous est présenté un bref aperçu des contraintes spécifiques de cette zone.

3.1.1.1. Contexte des pays constitutifs de la zone tropicale

A l'heure actuelle, 2,5 milliards de personnes ne disposent toujours pas de système d'assainissement « performant » dont plus de 40 % pratiquent la défécation à l'air libre (WHO, 2012). Les conséquences de l'absence de système d'assainissement sont nombreuses et ont des répercussions directes sur la santé publique (contamination de l'eau potable, préservation de la ressource en eau, ...) comme sur l'économie du territoire (pérennisation des activités industrielles, activités touristiques, ...).

La Figure 9 illustre l'état de l'assainissement dans le monde en 2010 et met en évidence le retard des pays de la zone tropicale.



WHO, 2012

Figure 9 : Carte mondiale représentant le pourcentage de population disposant d'un assainissement performant en 2010

3.1.1.2. Manque de financement et d'organisation de l'assainissement

Cependant, les pays en voie de développement, les plus souvent sujets à un développement démographique important, ne bénéficient que très rarement de soutien financier public. Ces contraintes tendent à augmenter le développement de risques sanitaires. Seules de rares régions, dont les plus urbanisées, ont recours à une gestion centralisée des effluents. Le système de gestion centralisée des effluents domestiques a été développé dans les pays les plus riches, il reste coûteux et nécessite une organisation territoriale de l'assainissement.

Dans le cas d'une gestion décentralisée des effluents, d'autres alternatives sont disponibles avec l'utilisation de fosses toutes eaux mais ces dernières nécessitent des vidanges régulières et un

traitement par le sol (Tzanakakis *et al.*, 2007). Plus récemment, la mise en place de toilettes sèches avec compostage de la matière (Bracken *et al.*, 2007; Langergraber et Muellegger, 2005) couplée avec une gestion des eaux ménagères se développe. Dans ce cas, le filtre planté peut être intéressant pour le traitement des eaux ménagères (Dallas et Ho, 2005; Shrestha *et al.*, 2001) avec une possibilité de réutilisation des eaux grises traitées (Li *et al.*, 2009).

Le traitement des eaux usées domestiques par filtres plantés s'inscrit autant dans une gestion centralisée ou semi-centralisée (cas des petites unités) qu'à l'échelle individuelle.

3.1.1.3. Expérimentations scientifiques

Au vu du coût des expérimentations scientifiques, la majorité des travaux de recherches scientifiques ont été menés dans les régions tempérées de l'Europe, des Etats Unis et de l'Australie. Seules quelques expérimentations dans la zone tropicale sont identifiables résultant le plus souvent de partenariats de recherches avec des laboratoires, associations et/ou universités des pays les plus développés (Denny, 1997; Kivaisi, 2001; Perfler *et al.*, 1999).

Dans ce contexte, on peut également s'interroger sur la **qualité des eaux usées domestiques brutes**. Les pratiques culturelles deviennent, dans ce cas, maîtresses de la qualité des effluents : récupération des eaux grises pour le jardin, effluent chargé ou à l'inverse présence de fosses toutes eaux en amont du réseau, effluent dilué, ... La caractérisation des effluents avant le dimensionnement des ouvrages est incontournable.

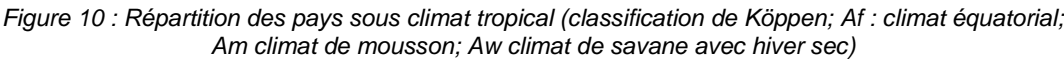
3.1.1.4. Qualité des données et précautions

Malgré la présence de certaines publications scientifiques sur le suivi des performances épuratoires des filtres, le problème de la qualité des mesures et des analyses est réel. L'échantillonnage au moyen de préleveurs automatiques réfrigérés nécessite un matériel coûteux et difficile à transporter. De ce fait, la majorité des études se basent sur des prélèvements ponctuels. Puis, autant le transport et la conservation des échantillons ont une influence directe sur les résultats analytiques. Les échantillons peuvent évoluer de manière significative dans le temps et ce, d'autant plus à de fortes températures. Enfin, les techniques normalisées d'analyses nécessitent un matériel important et une maintenance minutieuse au sein des laboratoires. Cet ensemble d'incertitudes peut peser lourdement sur la qualité des données publiées et induire des erreurs lors de comparaisons des procédés.

3.1.2. Aspects climatiques

Dès le début des expérimentations européennes et nord américaines, le rôle important des dégradations microbiologiques, connues pour être catalysées par la température, est identifié (Kadlec et Reddy, 2001). Des expérimentations ont alors débuté dans différents climats. La question du dimensionnement du système s'est majoritairement posée pour l'adaptation de ces procédés aux climats froids des pays nordiques (Jenssen *et al.*, 2010) et aux climats chauds et humides de la zone tropicale, intertropicale et équatoriale que l'on dénommera plus largement la zone tropicale.

Les différences entre les climats tropicaux et tempérés peuvent générer d'importantes adaptations techniques des systèmes. La zone tropicale (Figure 10) présente, en général, des climats chauds et humides avec une alternance de saison sèche et saison humide sans variation importante de température. Le régime des moussons ne concerne qu'une partie de la zone tropicale.



- Température moyenne de chaque mois de l'année > 18 C ;
- Pas de saison hivernale ;
- Fortes précipitations annuelles (supérieure à l'évaporation annuelle).

- *f* pour climat humide (précipitations tous les mois de l'année, pas de saison sèche) ;
- *m* pour climat de mousson (précipitations annuelles > 1 500 mm, précipitations du mois le plus sec < 60 mm) ;
- *w* pour climat à saison sèche en hiver ;
- *s* pour climat à saison sèche en été.

La variabilité locale des conditions climatiques (température et précipitations notamment) est très importante et ce, notamment dans le contexte des îles volcaniques avec des faciès de « côte au vent » et « côte sous le vent ». De ce fait, il est très difficile de généraliser les conditions climatiques des DOM et plus largement de la zone tropicale. L'absence d'hiver et la présence de précipitations de fortes intensités peuvent pourtant les caractériser.

Tableau 4 : Classification de Köppen, climat des DOM

Mai 2012 – p 27 / 76

3.1.2.2. Hydraulique et précipitations

Les rendements épuratoires des filtres plantés présentent une sensibilité aux variations hydrauliques et de température (Faulwetter *et al.*, 2009). Les périodes humides de la zone tropicale sont à l'origine d'intenses précipitations (records annuels 2011 de pluviométrie pour un jour : 172 mm/j en Martinique, 162 mm/j en Guadeloupe, 155 mm/j en Guyane ; données Météo-France) qui influent sur la charge hydraulique appliquée au filtre si le réseau n'est pas strictement séparatif. Diemont (2006) rapporte qu'en saison sèche les eaux usées contribuent à 75 % du volume en entrée de station comparé à 25 % en saison humide créant une variation saisonnière des charges organiques de l'effluent. Les procédés de sédimentation, d'aération, de transformations biologiques et d'adsorption associés au traitement seront dans ce cas affectés.

Cependant, dans le cas de réseau séparatif strict, l'influence de telles précipitations est mineure. Les charges hydrauliques appliquées au filtre sont généralement comprises entre 10 et 1 000 mm/j, sachant que la charge hydraulique moyenne pour un FPv eaux usées brutes est de 370 mm/j sur le filtre en fonctionnement (Molle *et al.*, 2005b).

3.1.2.3. Températures et dégradations

Parallèlement, dans les tropiques, les températures des régions de faible ou moyenne altitude ne varient que très faiblement au long de l'année et ne sont jamais inférieures à 0°C. Les filtres plantés sont sensibles aux faibles températures des hivers (Allen *et al.*, 2002; Kadlec et Reddy, 2001). En effet, l'activité microbienne réagit positivement à l'augmentation de températures (Faulwetter *et al.*, 2009). Ceci est très remarquable lors des suivis intersaisonniers de filtres (Chazarenc *et al.*, 2010). Pendant l'hiver, on constate une forte diminution de performances épuratoires associées à une diminution de l'activité microbienne. Dans ce cas, l'ensemble des réactions fortement dépendantes de l'activité des micro-organismes, comme les réactions de nitrification/dénitrification, dégradation de la matière organique sont affectées. En revanche, les réactions physico-chimiques (sédimentation, précipitation, adsorption, ...) sont très peu affectées par ces changements.

Une diminution des rendements épuratoires des composés azotés (NH_4 , NK, NO_2 , NO_3) et des paramètres organiques (DCO, DBO_5) est ainsi observée lors de refroidissement, tandis que l'élimination des matières en suspension et du phosphore (PO_4 , PT) semble peu affecté par ce changement.

3.1.3. Expérimentations scientifiques de la zone tropicale

3.1.3.1. Etat de l'art et échelle d'expérimentations

Il est important de distinguer les expériences de terrain conduites par des associations ou entreprises des études expérimentales de la recherche scientifique. Les premières apportent des retours d'expérience en terme de gestion des ouvrages, d'acceptation et d'usages par la population ainsi que les contraintes techniques spécifiques locales. Les expériences de terrain sont le témoin de l'usage pratique des procédés. En revanche, elles ne disposent qu'exceptionnellement de suivi et de diffusion d'analyses. A l'opposé, les études expérimentales s'attachent au suivi scientifique des performances des procédés en vue de les améliorer mais en s'affranchissant partiellement de l'aspect opérationnel.

3.1.3.2. Démarche de traitement des données

Les données recueillies proviennent de la littérature scientifique et concernent spécifiquement le traitement des eaux usées domestiques par filtres plantés dans la zone tropicale. Comme présentés ci-dessus, les retours d'expérience de terrain (non publiés) enrichissent les connaissances de ces procédés et notamment les leçons à retenir pour une meilleure exploitation.

L'ensemble des données des publications ont été classées selon trois grandes familles :

- Les filtres plantés à écoulement horizontal, FPh ;
- Les filtres plantés à écoulement vertical, FPv ;
- Les filtres plantés hybrides.

Un premier tri a permis de distinguer les expériences selon la taille des pilotes (Figure 11) :

- Microcosme : pilote type colonnes inférieur à 0,5 m² ;
- Mésocosme : pilote à taille réduite inférieur à 5 m² ;
- Macrocosme : pilote à taille réelle ou stations en opération.

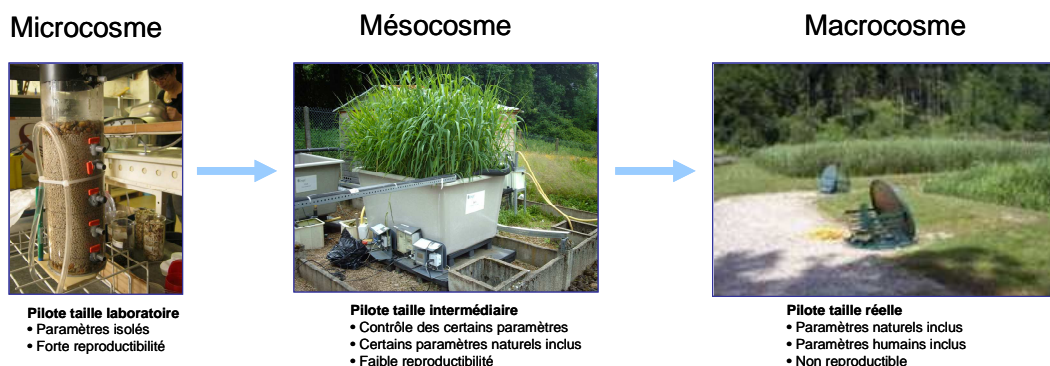


Figure 11 : Echelle des expérimentations et état de l'art

Un classement met en évidence un grand nombre de publications sur les FPh dont la majorité témoigne d'expérimentation à taille réelle (Tableau 5). Les filtres plantés hybrides sont répartis dans chacun des FPv et FPh.

Tableau 5 : Publications étudiées

| Echelle | FPv | FPh |
|------------|-----|-----|
| Microcosme | 6 | 6 |
| Mésocosme | 5 | 15 |
| Macrocosme | 10 | 29 |
| Total | 21 | 52 |

En complément des incertitudes analytiques présentées ci-dessus, la comparaison des données expérimentales entre chacune des études s'avère délicate compte tenu des variabilités suivantes :

- de la qualité de l'effluent en entrée ;
- du mode d'alimentation ;
- des durées d'alimentation et de repos ;
- des charges hydraulique et organique appliquées ;
- de l'âge du système ;
- des systèmes d'aération ;
- de la composition des massifs filtrants (matériaux et épaisseur) ;
- des espèces végétales ;
- des conditions climatiques ;
- des techniques d'échantillonnage ;
- des techniques d'analyses et de leur qualité.

Malgré l'ensemble de ces incertitudes, il est proposé d'établir une comparaison des résultats des publications considérées pour vérifier si des tendances générales peuvent se dégager de ces données.

L'analyse des résultats de ces expérimentations s'articule autour des problématiques évoquées ci-dessus et particulièrement en comparant les matériaux et espèces végétales utilisées ainsi que les performances des filtres.

3.1.3.3. Premiers résultats des microcosmes

Dans un premier, sont traitées les expérimentations en laboratoire, **microcosmes**, qui permettent d'isoler certaines caractéristiques des filtres afin de tester l'influence de certains paramètres sur les performances des filtres :

- La présence de plantes améliorent les performances du procédé (Caselles-Osorio *et al.*, 2011; Cui *et al.*, 2010; Dallas et Ho, 2005; Kantawanichkul *et al.*, 2009; Mosquera *et al.*, 2010; Rivera *et al.*, 1995) ;
- L'utilisation de plantes ornementales n'affectent pas les performances des filtres et peut permettre de valoriser la production végétale ((Zurita *et al.*, 2011) ;
- Des matériaux spécifiques peuvent être recyclés dans les filtres (stériles de haut-fourneau, sables ou charbon ou plastiques). Les matériaux plus chargés en calcium et aluminium semblent avoir de meilleures performances (Cui *et al.*, 2010) ;
- L'alimentation par bâchées améliorent les conditions d'oxygénation des FPv (Jia *et al.*, 2010) ;
- Les phases de repos améliorent les rendements épuratoires (DCO, N-NH₄, PT) (Jia *et al.*, 2010) ;
- Les filtres plus matures ont de meilleures performances (Cui *et al.*, 2010) ;
- L'augmentation de la charge hydraulique dégrade les performances du filtre (Cui *et al.*, 2010; Kantawanichkul *et al.*, 2009).

L'ensemble de ces observations sont conformes avec les études menées en climat tempérés (R.H. Kadlec and Wallace, 2009).

3.1.3.4. Expérimentations FPv eaux usées brutes type français

Parmi l'ensemble des expérimentations FPv étudiées, seules 3 expérimentations (Cota *et al.*, 2011; Liénard, 2010; Melián *et al.*, 2010) sur les 73 considérées dans ce rapport, s'approchent des techniques de FPv française (eaux usées brutes) (Tableau 6). L'expérience de Mayotte (Liénard, 2010) est issue d'un suivi encadré par Irstea et présenté en 4.1 de cette étude.

L'expérience conduite aux Canaries (Melián *et al.*, 2010) à la particularité d'alimenter les filtres en continu, ces derniers étant composé d'un matériau unique. Les performances seront comparées dans le chapitre 3.4.

Tableau 6 : Caractéristiques des expériences eaux usées brutes

| Lieu | Alimentation | Matériaux | | Végétal | Surface de filtre | Charge hydraulique* | Charge organique* |
|---|---|---|--|--|-------------------|---------------------|-------------------------|
| - | - | - | | - | m ² | m/l | g DCO/m ² /l |
| Mayotte, France Lotissement privé | bâchées alim. 7 jours repos 7 jours | Horizon de filtration Horizon de transition Horizon de drainage | 80 cm de gravier basaltique 4/6 mm 10 - 20 cm de gravier 6/10 mm 15 cm de gravier 20/40 mm | <i>Typha augustifolia</i> <i>Tysanolaena maxima</i> | 40,5 | 0,106 | 81 |
| Brésil Campus d'université | bâchées alim. 2 jours repos 4 jours | Horizon de filtration Horizon de transition Horizon de drainage | 40 cm de gravier concassé fin (d ₁₀ 0,8 et CU 8,75) 15 cm de gravier concassé moyen (d ₁₀ 0,7 et CU 2,71) 15 cm de gravier concassé 19/50 mm | <i>Typha latifolia</i> <i>Cynodon spp.</i> | 29 | 0,414 | nd |
| Canaries, Espagne Centre de recherches | continue | Matériau unique Matériau unique | 75 cm de roche basaltique 6,5 mm (d ₁₀ 4,11 CU 1,34) ou 80 cm de sédiment volcanique 2,7 mm (d ₁₀ 1,09, CU 2,3) | <i>Phragmites australis</i> | 0,27 0,31 | 0,037-0,079 | 42-144 |

* Charge hydraulique appliquée sur le filtre en fonctionnement sans recirculation

3.2. Disponibilité des matériaux

3.2.1. Matériaux généralement utilisés

La filière de traitement des eaux usées domestiques par FPv développée en France utilise des graviers et sables lavés (teneur en fines maximale de 3 %) en couches successives à granulométrie croissante avec la profondeur. Le premier étage de traitement des eaux usées brutes ne comporte pas de sables dans l'horizon superficiel mais des graviers fins tandis que le second étage, accueillant des effluents préalablement traités, est constitué de sable fin dans son horizon superficiel (Molle *et al.*, 2005b) (Figure 12).

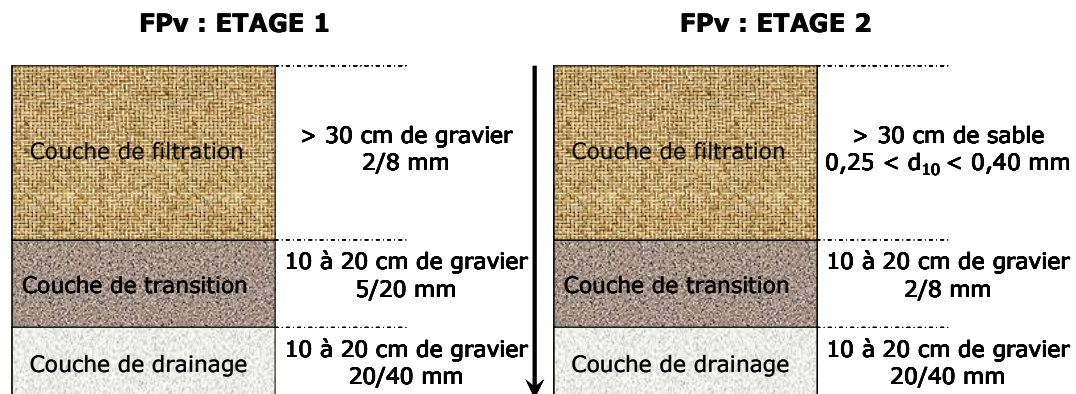
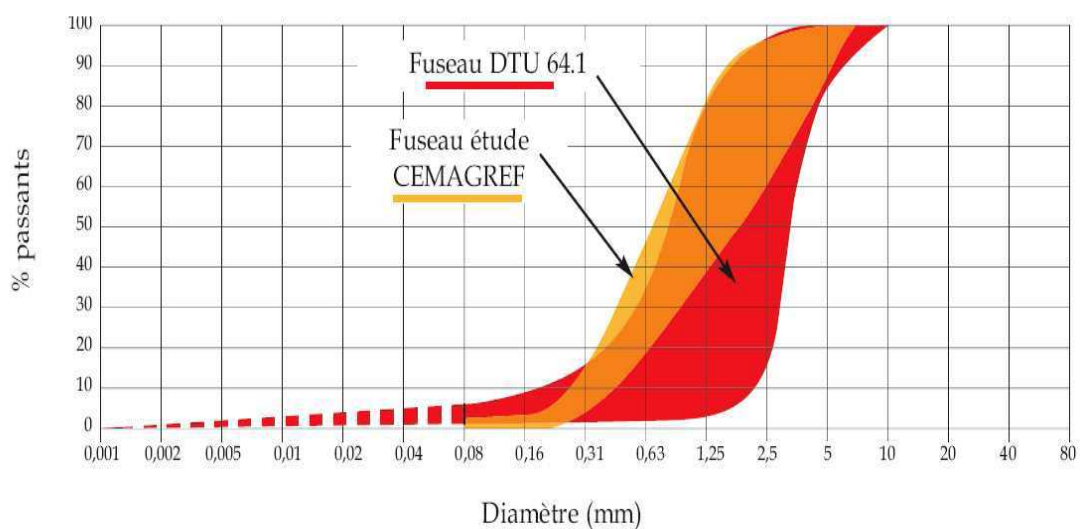


Figure 12 : Matériaux recommandés pour la filière à deux étages de traitement des eaux usées brutes par FPv (adaptée de Molle *et al.*, 2005b)

Les études portant sur la qualité des matériaux des filières de traitement à cultures fixées sur support fin (Guellaf, 1999; Liénard *et al.*, 2000, 2001) se sont intéressées principalement aux caractéristiques des sables afin d'appréhender l'hydraulique du système et d'augmenter sa durée de vie en limitant les risques de colmatage. S'est ainsi construit un fuseau granulométrique qui permet de valider les matériaux utilisés. Le fuseau initial extrait du DTU 64-1 a été affiné par des recherches Irstea suite de problèmes de colmatage (Figure 13).



étude Cemagref - étude DTU 64-1, août 1998

Figure 13 : Fuseaux granulométriques pour le choix des sables et graviers en assainissement

Ont été ainsi établies les règles suivantes pour le choix des sables constituant le filtre (Tableau 7) :

Tableau 7 : Prescriptions techniques pour le choix des sables du filtre (Liénard et al., 2000 et 2001)

| Facteurs limitant le colmatage pour les sables d'épuration |
|--|
| $0,25 < d_{10} < 0,40$ |
| $3 < CU < 6$ |
| Teneur en fines [0,08 mm] < 2,5 - 3 % |
| Teneur en calcaire < 4 % en CaCO_3 |

Les termes suivants servent à caractériser la distribution granulométrique du matériau :

- d_{10} , diamètre de maille laissant passer 10 % de la masse de sable, en mm ;
- d_{60} , diamètre de maille laissant passer 60 % de la masse de sable, en mm ;
- CU, le coefficient d'uniformité, rapport : d_{60}/d_{10} .

Ces exigences sont incontournables pour garantir la pérennité des systèmes. Comme appliquée aux sables, la teneur maximale en fines de 3 % doit être exigée pour les graviers ou autres matériaux.

Afin d'éviter la migration des éléments fins en profondeur, les règles de Terzaghi doivent être utilisées afin de dimensionner la granulométrie des horizons plus profonds. Elles sont représentées par les équations suivantes :

$$d_{15} \text{ couche transition} \leq 5d_{85} \text{ couche filtrante} \quad \text{Équation 1}$$

$$\frac{d_{50} \text{ couche drainante}}{10} \leq d_{50} \text{ couche transition} \leq \frac{d_{50} \text{ couche drainante}}{5} \quad \text{Équation 2}$$

Avec,

- $d_{15,le}$ diamètre de maille laissant passer 15 % de la masse de sable, en mm ;
- $d_{50,le}$ diamètre de maille laissant passer 50 % de la masse de sable, en mm ;
- $d_{85,le}$ diamètre de maille laissant passer 85 % de la masse de sable, en mm.

Par ailleurs, les caractéristiques chimiques des matériaux n'ont été que récemment prises en compte et ce, notamment pour leur potentiel à favoriser les phénomènes d'adsorption et/ou de précipitation chimique. Des essais sont menés à l'échelle pilote pour tester différents matériaux : cas de la bauxite, zéolite et calcaire (Stefanakis et Tsihrantzis, 2012), cas des matériaux apatitiques (Molle et al., 2002; Molle et al., 2003b; Molle et al., 2005b) pour le traitement du phosphore et l'amélioration des autres performances.

3.2.2. Matériaux dans la littérature scientifique

3.2.2.1. Matériaux utilisés pour les FPv

Les matériaux constitutifs des massifs filtrants de FPv sont, le plus souvent, des sables et graviers, agencés en alternance, le matériau le plus fin généralement en surface. Leur origine est variée : du sable et galets de rivière ou marin, aux roches concassées ; la minéralogie du matériau n'étant que marginalement prise en compte. Plus rarement et à titre expérimental, sont utilisés en alternance avec des graviers et sables, des cosses de coco (Dan et al., 2011), scories de haut fourneau (Cui et al., 2010) ; d'autres dispositifs disposent d'un massif filtrant à matériau unique (Zurita et al., 2011; Zurita et al., 2009).

Compte tenu du nombre important de paramètres influençant les dégradations biologiques (épaisseur de matériaux, granulométrie, agencement, qualité de l'effluent appliquées, charges appliquées et temps de repos, ...), il est difficile de mettre en avant une sélection ou un agencement de matériaux plus performants que d'autres.

L'étude des matériaux présents dans la littérature scientifique se restreindra à des aspects descriptifs (Tableau 8).

Les **expériences témoignant de colmatage** s'expliquent par l'utilisation de géotextile (Ouattara *et al.*, 2008, 2009), de sables fins (d_{10} 0.21 mm) (Sezerino *et al.*, 2003) et d'une surcharge de l'effluent à traiter en graisses (15 g/m²/j de graisses et huiles) (Giraldo et Zárata, 2001).

Les **hauteurs de matériaux** (filtration et drainage) varient entre 0.25 et 1.1 mètres avec une moyenne de 0.8 mètres.

Tableau 8 : Matériaux utilisés dans les FPv (bibliographie citée)

| Pays | Type d'effluents | Horizon | Matériaux | Classe matériaux | Epaisseur horizon | Profondeur totale filtre | Références |
|-------------------------|--|---|--|---|--|--------------------------|--|
| FPv non colmatés | | | | | | | |
| Mayotte | domestique | couche de filtration couche de transition couche de drainage | gravier basaltique gravier gravier | 4/6 6/10 20/40 | 0,8 0,1-0,2 0,15 | 1,1 | Liénard, 2010 |
| Mexique | domestique | couche de filtration | r. volcanique | 12 | 0,7 | 0,7 | Zurita <i>et al.</i> , 2009 Zurita <i>et al.</i> , 2011 |
| Canaries | domestique (campus) | couche de filtration couche de filtration | r. basaltique concassée sédiment volcanique | 6,5 2,7 | 0,75 0,8 | 0,75 0,8 | Melián <i>et al.</i> , 2010 |
| Nepal | hôpital | couche de filtration couche de transition couche de drainage | sable gravier gravier | 1/3 5/8 10/20 | 0,75 0,1 0,15 | 1 | Laber <i>et al.</i> , 1999 |
| Nepal | eaux grises | couche de filtration couche de drainage | sable grossier gravier | 20/40 | 0,8 0,2 | 1 | Sheshta <i>et al.</i> , 2001 |
| Chine | domestique | couche de filtration couche de transition couche de drainage | sable marin gravier gravier | 1/2 6/12 50/120 | 0,5 0,2 0,4 | 1,1 | Zhu <i>et al.</i> , 2010 |
| Chine | domestique (campus) | couche de filtration | sol | | 0,6 | 0,6 | Liang <i>et al.</i> , 2011 |
| Chine | domestique | couche de filtration couche de drainage | sables, scories ou stériles gravier | | 0,2 0,05 | 0,25 | Cui <i>et al.</i> , 2010 |
| Chine | aquaculture diluée | couche de filtration couche de transition couche de drainage | sable fin gravier gravier grossier | 0,5/5 40/70 50/120 | 0,4 0,1 0,5 | 1 | Ge <i>et al.</i> , 2011 |
| Chine | synthétique | couche de filtration couche de transition couche de drainage | sable lavé gravier lavé gravier de rivière lavé | 10/30 40/50 | 0,15 0,4 0,05 | 0,6 | Jia <i>et al.</i> , 2010 |
| Chine | domestique | couche de filtration couche de filtration couche de transition couche de drainage | gravier sable gravier gravier | petit petit petit gros | 0,3 0,3 0,1 0,1 | 0,8 | Du <i>et al.</i> , 2009 |
| Chine | domestique | couche de filtration couche de transition couche de drainage | sable marin gravier gravier | 1/2 6/12 50/120 | 0,5 0,2 0,4 | 1,1 | Zhang <i>et al.</i> , 2010 |
| Thaïlande | agricole diluée | couche de filtration couche de drainage | gravier sable | 2/5 1 | 0,1 0,3 | 0,4 | Kantawanichkul <i>et al.</i> , 1999 |
| | domestique | couche de filtration couche de drainage | gravier sable | 2/8 1/2 | 0,1 0,4 | 0,5 | |
| Thaïlande | synthétique | couche de filtration couche de transition couche de drainage | sable gravier gravier | 1/2 6/12 30/60 | 0,2 0,15 0,15 | 0,5 | Kantawanichkul <i>et al.</i> , 2009 |
| Indonésie | agricole | couche protection couche protection couche filtrante couche drainante couche drainante | graviers graviers sable de rivière graviers graviers | 8/16 16/32 8/16 16/32 | 0,15 0,15 0,5 0,15 0,15 | 1,1 | Kurniadie, 2011 |
| Indonésie | domestique | couche protection couche protection couche protection couche filtrante couche drainante couche drainante | gravier gravier gravier sables gravier gravier | 8/16 8/32 8/16 8/16 16/32 | 0,1 0,15 0,05 0,6 0,05 0,15 | 1,1 | Kurniadie <i>et al.</i> , 2009 |
| Brésil | domestique | couche de filtration couche de transition couche de drainage | gravier concassé gravier concassé gravier concassé | fin moyen 19/50 | 0,4 0,15 0,15 | 0,7 | Cota <i>et al.</i> , 2011 |
| FPv colmatés | | | | | | | |
| Brésil | lisiers de porcs | couche de filtration couche de filtration | sables sables | d_{10} 0,21 / CU 2,14 d_{10} 0,23 / CU 6 | 0,9 0,9 | 0,9 0,9 | Giraldo <i>et al.</i> , 2001 |
| Colombie | cuisine et toilettes avec intrusion marine | couche de filtration couche de drainage | sables graviers | | 0,2 0,4 | 0,6 | Sezerino <i>et al.</i> , 2003 |
| Côte d'Ivoire | domestique | couche de filtration couche de transition couche de drainage | sable géotextile gravier | | 0,3 0,1 | 0,4 | Ouattara <i>et al.</i> , 2008 Ouattara <i>et al.</i> , 2011 |

3.2.2.2. Matériaux utilisés pour les FPh

Les expériences de FPh révèlent majoritairement des matériaux classiques : sable et graviers de natures diverses (roches sédimentaires, magmatiques ou métamorphiques) présentant des minéralogies différentes. A titre expérimental, sont également étudiés la valorisation de cendres avec un mélange de gravier et cendres (Ascuntar Ríos *et al.*, 2009), de bouteilles plastiques PET découpées en morceaux (Dallas et Ho, 2005), scories de métal (Dornelas *et al.*, 2009), de mélange sol et sable (Huang *et al.*, 2010; Rivera *et al.*, 1995) (Juwarakar *et al.*, 1995), cosses de coco ((Dan *et al.*, 2011).

Les granulométries utilisées dans la littérature varient entre **des sables fins de 0,5 mm de diamètre à des graviers grossiers allant jusqu'à 20 mm de diamètre**. La présence de gabions de graviers et galets en entrée et sortie de filtre pour favoriser les écoulements est très courante.

La **hauteur de matériaux** est au minimum de 0,25 mètres à 1 mètre maximum avec une moyenne de 0,5 mètre.

Quelques rare cas (Dan *et al.*, 2011; Jinadasa *et al.*, 2006; Lim *et al.*, 2001) utilisent un massif filtrant stratifié verticalement pour le traitement à écoulement horizontal, des courts-circuits hydrauliques sont, dans ces cas identifiés (Dan *et al.*, 2011).

Afin **de prévenir le développement de moustiques**, certains auteurs privilégient la mise en place de quelques centimètres de sol (Jinadasa *et al.*, 2008; Nyakang'o et Van Bruggen, 1999), d'argile et humus (Mashauri *et al.*, 2000) ou de papier journal (Dallas et Ho, 2005) en surface du filtre. Cette adaptation a été également mise en place à Mayotte en utilisant du gravier fin (2/6 mm) en surface du filtre.

3.2.3. Matériaux présents localement dans les DOM

Le transfert de cette technologie dans les DOM français induit une adaptation des matériaux au contexte local. Chaque DOM présentant une histoire géologique différente, disposent de matériaux locaux différents (Tableau 9).

L'arc volcanique des Antilles auquel appartiennent la Guadeloupe et la Martinique est constitué globalement de roches massives magmatiques à faciès andésitique typique des zones de subduction avec la présence de matériaux pyroclastiques associés (cendres et pouzzolane). On peut noter la présence de calcaire sur la Grande Terre de Guadeloupe. De rares sables (fluviaux et marins) sont disponibles.

La Guyane continentale présente une histoire géologique ancienne et complexe dont les témoins principaux sont des roches métamorphiques et plutoniques de type granitique. Le réseau hydrographique dense de la Guyane offre également un large panel de sables fluviaux, détritiques et littoraux. L'érosion intense des matériaux provoque la formation de latérites actuellement exploitées.

L'archipel des Comores avec Mayotte ainsi que l'archipel des Mascareignes qui accueille l'île de La Réunion sont des ensembles volcaniques récents (-10 millions d'années) présentant un large spectre de roches massives de type basaltique. La Réunion a la particularité de fournir en grande quantité des matériaux fluviaux (sables et galets).

Des détails sur l'ensemble de ces matériaux sont disponibles en Annexe 2.

Tableau 9 : Carrières et matériaux disponibles dans les DOM
source : Observatoire des matériaux, BRGM; Schémas Départementaux des Carrières

| | Nombre de carrières en activité | Matériaux majoritaires disponibles | Matériaux secondaires disponibles |
|------------|---------------------------------|---|--|
| Guyane | 29 | roches massives diverses | sables fluviaux, roche concassée et latérites |
| Guadeloupe | 23 | roches et sables volcaniques | calcaire et sables marins |
| Martinique | 16 | laves volcaniques, matériaux pyroclastiques | pouzzolane et argiles |
| La Réunion | 14 | alluvions fluviaux | alluvions marines, roches massives, pouzzolane |
| Mayotte | 6 | roches volcaniques massives | cendres, argiles et pouzzolanes |

Au vu des fiches techniques reçues par différentes carrières dans les DOM, un large spectre de graviers (du 2/4 au 30/60 mm) est disponible. La difficulté réside dans la qualité des sables proposés, la teneur en fines étant très souvent trop importante pour constituer un matériau conforme aux exigences des matériaux utilisés en assainissement. De plus, aucune donnée n'est disponible sur la quantité de fines dans les graviers. Ces matériaux devront impérativement être lavés avant leur installation dans le filtre.

Une attention particulière devra être portée sur la qualité des matériaux lors de la réception pendant le chantier de construction. Un matériau pas ou mal lavé peut diminuer considérablement la durée de vie de l'installation voire colmater le filtre dès son démarrage.

Compte-tenu des données exposées ci-dessus, l'établissement d'un deuxième étage de filtration avec l'utilisation de sables semble critique. Dans le cas de l'utilisation de sables, une vigilance extrême devra être accordée à leur qualité.

3.3. Choix des espèces végétales

3.3.1. Rappel du rôle des plantes

Les filtres (FPv et FPh) sont généralement plantés de macrophytes (espèces végétales aquatiques macroscopiques) émergents. Selon le régime hydraulique du filtre et la charge organique appliquée, différentes espèces végétales seront utilisées. Le système français FPv avec application d'eaux usées brutes utilise quasi exclusivement *Phragmites australis* comme espèce végétale. Cependant, des retours d'expérience sur des ouvrages appliquant également des eaux usées brutes en surface de filtre à l'île Maurice dénotent une adaptation réussie d'*Arundo donax* sur ces systèmes (échanges SINT).

Le rôle des macrophytes initialement remis en cause dans la littérature scientifique est aujourd'hui admis comme **catalyseur de l'activité microbienne** dans le filtre (Brix, 1997) favorisant l'abattement des paramètres dépendant de dégradations biologiques (DBO₅, DCO, azote, pathogènes) (Vymazal, 2011). En effet, les communautés microbiennes du filtre semblent être plus importantes et plus structurées dans les filtres plantés comparé au filtre nu (Chong-Bang Zhang *et al.*, 2010). Cependant, les effets des plantes et les différences entre les espèces végétales sont d'autant plus importants à 4°C, lors de la période de dormance que pendant la période de croissance à 24°C (Allen *et al.*, 2002).

L'assimilation de nutriments par le végétal, attendu comme un mécanisme majoritaire de dégradation de la pollution de l'effluent, peut être en effet significatif pour les effluents très dilués (Langergraber, 2005) mais très minoritaire pour des effluents concentrés (Tanner *et al.*, 2002). Si on considère un faucardage par année en climat tempéré, la charge en nutriments évacuée par les végétaux est très faible. Dans le climat tropical, l'ensemble des expériences rapporte une fréquence de faucardage plus élevée ; cette fréquence pouvant être augmentée afin de stimuler le stockage des nutriments par les plantes (Konnerup *et al.*, 2009). Cependant, la charge stockée par les végétaux demeurent très faible au regard des charges appliquées sur les filtres (moyenne de 3 g N/m²/j pour les FPh et de 7 g N/m²/j pour les FPv).

Il est important de souligner le **rôle mécanique** attendu du végétal sur le FPv eaux usées brutes. En effet, l'application d'eaux brutes en surface du filtre favorise la formation d'un dépôt superficiel qui limite l'infiltration de l'effluent (Figure 14). Dans ce cas, le végétal a un rôle prépondérant dans le transfert des effluents dans le filtre. Le choix du végétal pour ce type de procédé devra prendre en considération cet aspect.



Irstea

Figure 14 : Surface d'un FPv eaux usées brutes en début de croissance des végétaux

Par ailleurs, certains auteurs se sont intéressés à comparer les différences entre **monoculture et polyculture** sur les performances des filtres (Chong-Bang Zhang *et al.*, 2010). En ressort de ces expérimentations que la polyculture favorise le développement des communautés microbiennes et ainsi des performances associées. Cependant, les expérimentations conduites sur plusieurs années (Liang *et al.*, 2011) mettent en évidence une compétition interspécifique des espèces végétales qui conduit à une domination d'une espèce (*Phragmites australis*) sur les autres (*Canna indica*, *Cyperus flabelliformis*, *Pennisetum purpureum* et *Hymenocallis littoralis*).

3.3.2. Expérience tropicale

3.3.2.1. Espèces végétales utilisées

Les expériences en domaine tropical sont le témoin de l'usage de différentes espèces végétales et sont présentées ci-dessous. Les profondeurs racinaires des végétaux sont sensibles à la disponibilité en eau des filtres et semblent varier.

Traditionnellement, les plantes comportant une croissance rapide telles que *Phragmites spp.* et *Typha spp.* sont utilisées dans les FPh. D'autres espèces végétales sont présentées ci-dessous (Tableau 10).

Tableau 10 : Espèces végétales des FPh

| Espèce végétale | Références |
|---------------------------------------|--|
| <i>Acorus calamus</i> | Zhang et al., 2011 |
| <i>Agapanthus africanus</i> | Zhang et al., 2011 |
| <i>Anthurium andreaeanum</i> | Zhang et al., 2011 |
| <i>Arundo donax</i> | Radha Madhaw et al., 2002 |
| <i>Brachiaria mutica</i> | Katsenovich et al., 2009 |
| <i>Camelia japonica</i> | Huang et al., 2010 |
| <i>Canna generalis</i> | Konnerup et al., 2009; Huang et al., 2010 |
| <i>Canna hybrids</i> | Zurita et al., 2006 |
| <i>Canna indica</i> | Zhang et al., 2011 |
| <i>Coix lacryma-jobi</i> | Dallas and Ho, 2005 |
| <i>Colocasia esculenta</i> | Mbuligwe, 2004 |
| <i>Cyperus alternifolius</i> | Ayaz, 2008 |
| <i>Cyperus papyrus</i> | Okurut et al., 1999; Mburu et al., 2008; Zhang et al., 2011 |
| <i>Dracaena sanderiana</i> | Huang et al., 2010 |
| <i>Eleocharis mutata</i> | Caselles-Osorio et al., 2011 |
| <i>Eriochloa aristata</i> | Caselles-Osorio et al., 2011 |
| <i>Heliconia psittacorum</i> | Konnerup et al., 2009; Ascuntar Ríos et al., 2009; Mosquera et al., 2010 |
| <i>Hemerocallis dumortieri</i> | Zurita et al., 2006 |
| <i>Ipomea aquatica farsk</i> | Huang et al., 2010 |
| <i>Iris tectorum</i> | Zhang et al., 2011 |
| Napier grass | Butler, 1990 |
| <i>Pennisetum purpureum</i> | Platzer et al., 2004 |
| <i>Phragmites australis</i> | Agudelo et al., 2010; Ahmed et al., 2008; Ascuntar Ríos et al., 2009; Bayley et al., 2003; Davison et al., 2001; Davison et al., 2005; Melián et al., 2010; Rivera et al., 1995; Tomenko et al., 2006; Williams et al., 1999 |
| <i>Phragmites karka</i> | Billore et al., 1999; Juwarkar et al., 1995; Laber et al., 1999; Radha Madhaw et al., 2002 |
| <i>Phragmites mauritianus</i> | Kaseva, 2004; Njau et al., 2011; Okurut et al., 1999 |
| <i>Schoenoplectus tabernaemontani</i> | Headley et al., 2005 |
| <i>Scirpus grossus</i> | Jinadasa et al., 2006 |
| <i>Sesbanian sesban</i> | Dan et al., 2011 |
| <i>Strelitzia reginae</i> | Zurita et al., 2011; Zurita et al., 2006, 2009 |
| <i>Thalia dealbata</i> | Zhang et al., 2011 |
| <i>Thalia geniculata</i> | Katsenovich et al., 2009 |
| <i>Typha augustifolia</i> | Esser et al., 2010; Lim et al., 2001; Polprasert and Sawaitayothin, 2006; Sawaitayothin and Polprasert, 2006; Williams et al., 1999; Zhang et al., 2011a; Zhang et al., 2012 |
| <i>Typha latifolia</i> | Juwarkar et al., 1995 |
| <i>Typha ssp</i> | Kelvin and Tole, 2011; Nyakang'o and Van Bruggen, 199 |
| <i>Typha subulata</i> | Da Motta Marques et al., 2001 |
| <i>Zantedeschia aethiopica</i> | Belmont and Metcalfe, 2003; Zurita et al., 2011; Zurita et al., 2006, 2009 |
| <i>Zizaniopsis bonariensis</i> | Da Motta Marques et al., 2001; Luiz Philippi, 1999 |

Les végétaux utilisés dans les FPv issus des expériences tropicales ainsi que les retours d'expériences associés témoignent de nombreuses espèces végétales différentes (**Tableau 11**). Cependant, il faut toutefois rappeler la différence entre FPv eaux usées brutes et FPv après traitement primaire en terme de charge et les conséquences induites sur les végétaux.

Tableau 11 : Espèces végétales des FPv

| Végétaux | Observations | Références |
|---|--|---|
| <i>Acorus calamus</i> | | Ge et al., 2011 |
| <i>Agapanthus africanus</i> | mauvaise adaptation au FPh | Zurita et al., 2009 Zurita et al., 2011 |
| <i>Anthurium andreanum</i> | sensible aux variations de température | Zurita et al., 2009 Zurita et al., 2011 |
| <i>Arundo donax</i> et <i>Phragmites australis</i> | nd | Zhu et al., 2010 Ge et al., 2011 |
| <i>Campylotropis macrocarpa</i> | - | Zhang et al., 2010 |
| <i>Campylotropis macrocarpa</i> , <i>Cassia tora</i> , <i>Lespedeza bicolor</i> et <i>Indigofera pseudotinctoria</i> | nd | Zhu et al., 2010 |
| <i>Canna indica</i> | - | Zhang et al., 2010 Cui et al., 2010 Ge et al., 2011 |
| <i>Canna indica</i> , <i>Cyperus alternifolius</i> , <i>Lythrum salicaria</i> et <i>Thalia dealbata</i> | nd | Zhu et al., 2010 |
| <i>Canna indica</i> , <i>Cyperus flabelliformis</i> , <i>Phragmites australis</i> , <i>Pennisetum purpureum</i> et <i>Hymenocallis littoralis</i> | compétition interspécifique | Liang et al., 2011 |
| <i>Cassia tora</i> Linn. | mauvaise adaptation | Zhang et al., 2010 |
| <i>Coix lacrymajobi</i> | nd | Ge et al., 2011 |
| <i>Coix lacryma-jobi</i> , <i>Imperata cylindrical</i> , <i>Miscanthus sinensis</i> , <i>Neyraudia montana</i> , <i>Saccharum arundinaceum</i> et <i>Triarrhena sacchariflora</i> | nd | Zhu et al., 2010 |
| <i>Cynodon ssp</i> | nd | Cota et al., 2011 |
| <i>Cyperus alternifolius</i> | - | Zhang et al., 2010 |
| <i>Cyperus flabelliformis</i> | - | Kantawanichkul et al., 1999 |
| <i>Cyperus involucreatus</i> | - | Kantawanichkul et al., 2009 |
| <i>Imperata cylindrical</i> | - | Zhang et al., 2010 |
| <i>Indigofera pseudotinctoria</i> | - | Zhang et al., 2010 |
| <i>Lolium perenne</i> | - | Ge et al., 2011 |
| <i>Lythrum salicaria</i> | - | Zhang et al., 2010 |
| <i>Miscanthus floridulus</i> | nd | Ge et al., 2011 |
| <i>Neyraudia montana</i> Ken | mauvaise adaptation | Zhang et al., 2010 |
| <i>Phragmites australis</i> | - | Melián et al., 2010 Zhang et al., 2010 Jia et al., 2010 |
| <i>Phragmites karka</i> | - | Laber et al., 1999 Kurniadie, 2011 |
| <i>Phragmites karka</i> et <i>Canna sp</i> | - | Shetha et al., 2001 |
| <i>Reineckia carnea</i> | nd | Ge et al., 2011 |
| <i>Saccharum arundinaceum</i> Retz. | mauvaise adaptation | Zhang et al., 2010 |
| <i>Sapindus mukorossi</i> Gaertn. | mauvaise adaptation | Zhang et al., 2010 |
| <i>Sesbania seban</i> | conditions saturées | Dan et al., 2010 |
| <i>Strelitzia reginae</i> | meilleure adaptation au FPv | Zurita et al., 2009 Zurita et al., 2011 |
| <i>Thalia dealbata</i> | mauvaise adaptation | Zhang et al., 2010 |
| <i>Thysanotonea maxima</i> | - | Liénard et al., 2010 |
| <i>Tradescantia reflexa</i> | nd | Ge et al., 2011 |
| <i>Triarrhena sacchariflora</i> | - | Zhang et al., 2010 |
| <i>Typha angustifolia</i> L. | mauvaise adaptation nd | Kantawanichkul et al., 2009 Liénard et al., 2010 |
| <i>Typha latifolia</i> | stress hydrique | Cota et al., 2011 |
| <i>Vetiveria zizanioides</i> Nash | - | Kantawanichkul et al., 1999 |
| <i>Zantedeschia aethiopica</i> | meilleure adaptation au FPh | Zurita et al., 2009 Zurita et al., 2011 |

3.3.2.2. Esthétique des ouvrages et intégration

Malgré les avantages des végétaux sur les filtres exposés ci-dessus, les expériences du domaine tropical mettent également en lumière l'esthétique du végétal (Brix et al., 2007) et son acceptation au sein de la communauté. En effet, il est remarqué que l'intégration paysagère de l'ouvrage favorise l'implication des agents dans la maintenance et l'entretien (Figure 15 et Figure 16) mais aussi l'acceptation et le respect de l'installation par la population environnante.

Au delà de l'aspect esthétique, certaines croyances ou pratiques culturelles peuvent influencer l'engagement des agents et usagers sur les installations. De nombreuses plantes sont associées à des rites ou usages sacrés pour se protéger de certains esprits ou maladies. Les eaux usées, de façon quasi-systématique, sont perçues comme dangereuses. La station de traitement des eaux usées devient dans ce cas, un lieu potentiellement risqué dont il faut se protéger. La discipline scientifique en charge d'appréhender ces relations socioculturelles entre plantes et croyances associées est l'ethnobotanique.

La considération de ces pratiques culturelles ne peut que favoriser l'intégration de nouvelles techniques et pérenniser leur bon fonctionnement.



Figure 15 : Filtre planté hybride de Ko Phi Phi en Thaïlande, aspect esthétique (2008)

3.3.2.3. Valorisation des végétaux

Par ailleurs, certains auteurs s'intéressent également à la valorisation des végétaux composant le filtre (Belmont et Metcalfe, 2003; Zurita *et al.*, 2009 et 2011). En effet, les filtres plantés favorisent la croissance des végétaux. Dans ce sens, certains auteurs perçoivent la possibilité d'exploiter un nouveau gisement de biomasse à faible coût. La contrainte principale est le risque sanitaire. C'est pourquoi, seules les plantes ornementales ou destinées à l'industrie (biocarburants, ressources industrielles ou forestières) sont aujourd'hui considérées (Belmont et Metcalfe, 2003; Perbangkhem et Polprasert, 2010).

Sont notamment citées les voies de valorisation suivantes (Heers, 2006) :

- Valorisation énergétique (combustion et production de biogaz) ;
- Valorisation agricole (compost, production de fertilisant, amendement organique) ;
- Production fourragère ;
- Valorisation industrielle (production de papier et pulpes, artisanat, matériel de construction, matériel de conditionnement, production de produits chimiques).



Irstea

Figure 16 : Bâchées sur un FPv

3.3.3. Problématique espèces invasives dans les différents DOM

Les espèces exotiques envahissantes (EEE) sont aujourd'hui considérées comme l'une des plus grandes menaces pour la biodiversité.

Les DOM sont des milieux particulièrement sensibles aux invasions biologiques hébergeant des réserves naturelles exceptionnelles. La Guyane continentale est recouverte à plus de 80% de forêt humide équatoriale à très haut niveau de biodiversité. Le milieu insulaire des autres DOM représentent un milieu fragile, vulnérable aux espèces exotiques envahissantes.

On considère **EEE**, une espèce exotique (allochtone, non indigène) dont l'introduction par l'homme (volontaire ou fortuite), l'implantation et la propagation menacent les écosystèmes, les habitats ou les espèces indigènes avec des conséquences écologiques et/ou économiques et/ou sanitaires négatives (Soubeyran, 2008).

Dans ce contexte, l'introduction d'espèces allochtones dans les DOM n'est pas envisageable. Cependant, l'utilisation de plantes présentes dans les DOM mais considérées comme invasives peut présenter le risque de favoriser leur propagation. Des mesures préventives sont nécessaires en amont des expérimentations en vérifiant le statut des espèces végétales sélectionnées dans ces territoires afin d'éviter toute propagation problématique.

Le procédé d'épuration par filtres plantés développé en France métropolitaine utilise quasi exclusivement *Phragmites australis* comme espèce végétale. *Arundo donax* qui appartient à la famille des Poaceae est utilisé à l'île Maurice sur des procédés FPV du type français et présente une adaptation réussie mais une maintenance difficile (faucardage et maintien de l'espèce dans le filtre).

Le statut de *Phragmites australis* dans chacun des DOM n'est pas clairement établi comme en justifie la majorité des échanges avec les services botaniques locaux (Tableau 12).

Tableau 12 : Statut de *Phragmites australis* et *Arundo donax* dans les DOM (sources citées)

| | <i>Phragmites australis</i> | <i>Arundo donax</i> | Source |
|------------------------|-----------------------------|---------------------|--|
| Guadeloupe | cryptogène | allochtone | Conservatoire Botanique des Iles de Guadeloupe |
| Guadeloupe dépendances | absent | absent | Conservatoire Botanique des Iles de Guadeloupe |
| Guyane | autochtone | introduite | Herbier de Guyane, IRD |
| La Réunion | absent | absent | Conservatoire Botanique National de Mascarin |
| Martinique | rare | rare | DEAL, Martinique |
| Mayotte | ? | ? | Conservatoire Botanique National de Mascarin |

Des espèces végétales de substitution sont identifiées et seront testées dans le cadre d'expérimentations. Une attention particulière devra être maintenue pour l'implantation de filtres plantés dans certaines zones protégées habitées (cœurs habités du Parc National de La Réunion, Guyane)

3.4. Performances épuratoires

3.4.1. Filtres à écoulement vertical

3.4.1.1. Représentation des données bibliographiques

Les données recueillies rassemblent un grand nombre d'informations qui, pour de nombreuses raisons exposées ci-dessus (paragraphe 3.1.3), doivent être manipulées avec précautions. Pour les FPV, ont été éliminées les expériences à flux ascendant (seuls retenus les FPV stricts) et en opération en conditions saturées ainsi que les expériences présentant un colmatage.

La représentation par boîte à moustaches a été choisie afin d'illustrer la distribution des données de la bibliographie (Figure 17).

Les références bibliographiques sont présentées plus explicitement en Annexe 3.

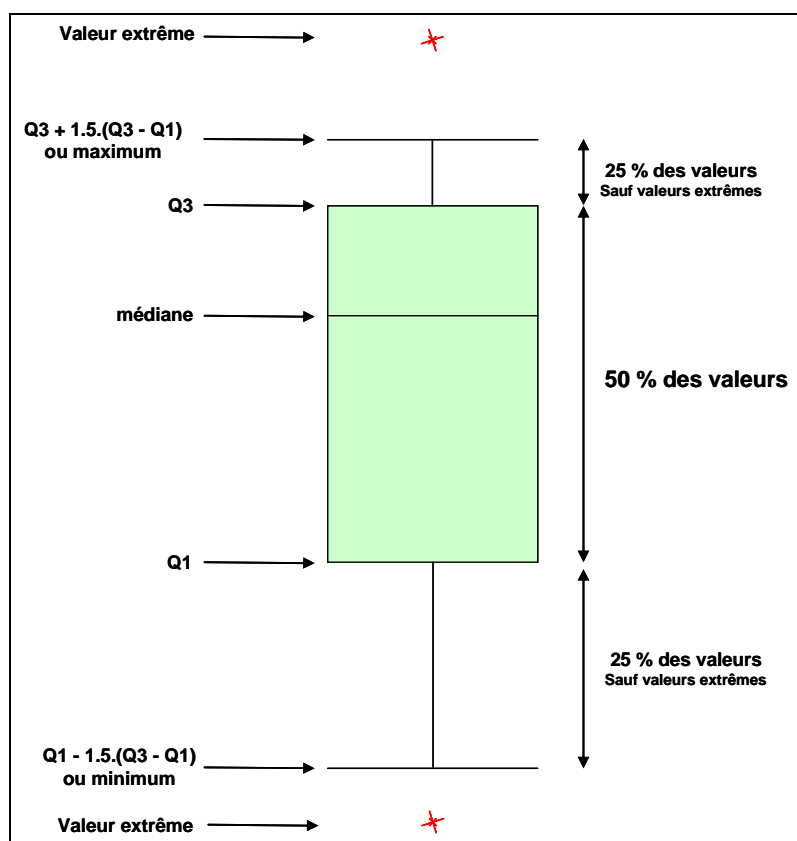


Figure 17 : Représentation par boîte à moustaches

3.4.1.2. Charges appliquées sur les FPv

Une première représentation (Tableau 13 et Figure 18) illustre les charges appliquées sur les FPv des expériences tropicales. Sur une vingtaine de valeurs considérées, on remarque un groupe de données quasi-homogène et 3 données isolées considérées comme valeurs extrêmes.

Tableau 13 : Charges appliquées sur les FPv (données bibliographiques)

| | DCO | MES | N-NH ₄ | PT |
|-----------------------|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | <i>g O₂/m²/j</i> | <i>g/m²/j</i> | <i>g/m²/j</i> | <i>g/m²/j</i> |
| Minimum | 2,0 | 0,8 | 0,5 | 0,2 |
| Premier quartile | 9,2 | 2,1 | 0,7 | 0,3 |
| Médiane | 10,4 | 2,3 | 1,4 | 0,5 |
| Troisième quartile | 20,4 | 4,6 | 14,5 | 1,2 |
| Maximum | 144,0 | 51,0 | 50,0 | 1,9 |
| Ecart interquartile | 11,2 | 2,5 | 13,8 | 0,9 |
| Valeurs extrêmes max. | 3 | 3 | 1 | 0 |
| Valeurs extrêmes min. | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Nombre de valeurs | 28 | 16 | 24 | 19 |

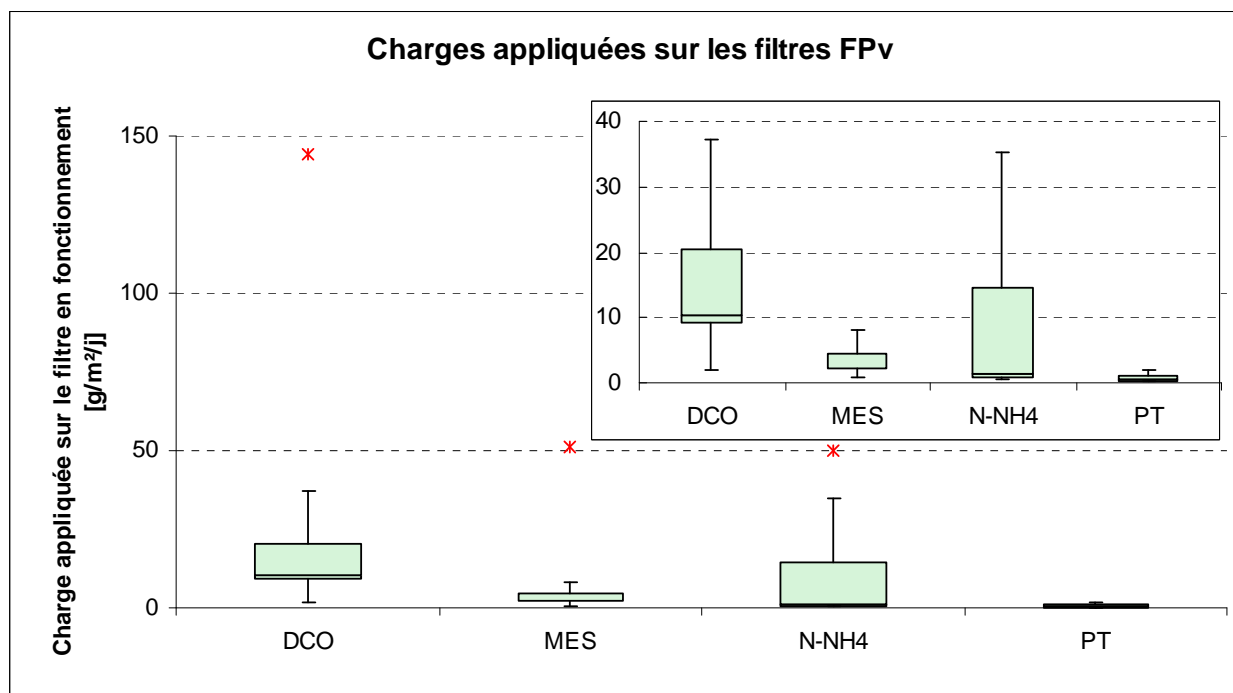


Figure 18 : Charges appliquées sur le filtre en fonctionnement pour les FPv

On constate rapidement que les charges appliquées sur le FPv en fonctionnement varient entre 2 et 37 g DCO/m²/j pour la DCO avec 3 valeurs extrêmes (42 ; 81 et 144 g DCO/m²/j) et 50 % des données comprises entre 9,2 et 20,4 g DCO/m²/j. Les charges en DCO appliquées au filtre comprennent deux groupes de données : les données majoritaires représentatives des expériences conduites avec des eaux usées prétraitées et les données extrêmes, proches des données des FPv eaux usées de métropole (230 g DCO/m²/j sur le filtre en fonctionnement du premier étage).

Ces observations se confirment avec les données des matières en suspension comprises à plus de 90% entre 0,8 et 8 g MES/m²/j avec 3 valeurs extrêmes (11 ; 25 et 51 g MES/m²/j). Les variations de charges appliquées en matières en suspension sur le FPv en fonctionnement ne sont que très faibles (inférieures à 10 g MES/m²/j) tandis que les valeurs extrêmes sont jusqu'à 6 fois plus supérieures.

La distribution des charges appliquées en azote et phosphore est plus homogène et ne comporte qu'une seule valeur extrême pour l'azote (50 g/m²/j).

Les valeurs extrêmes correspondent aux expérimentations de Melian aux Canaries et de Liénard et Esser à Mayotte (voir ci-après Démarrage des expérimentations, le cas de Mayotte) (Esser *et al.*, 2010; Melián *et al.*, 2010) qui utilisent chacune des eaux usées brutes.

Ces représentations soulignent **le clivage entre les FP « classiques » et les FP « eaux usées brutes »** en terme de charges appliquées, et ce particulièrement pour la matière organique (DCO et DBO₅) et les matières en suspension. Les charges en nutriments dépendent de la qualité des effluents en entrée. **En ordre de grandeur, les FP pour le traitement secondaire ou le deuxième étage de filtre reçoivent une charge organique inférieure à 40 g DCO/m²/j et une charge en MES inférieure à 10 g/m²/j.**

Dans un second temps, les Figure 19, Figure 20 et Figure 21 montrent que les fortes charges appliquées n'affectent pas les rendements pour les paramètres DCO, MES et NH₄. **Les limites de systèmes ne semblent pas atteintes.**

Les données présentées intègrent toutes charges hydrauliques confondues ce qui conforte l'idée de robustesse du système.

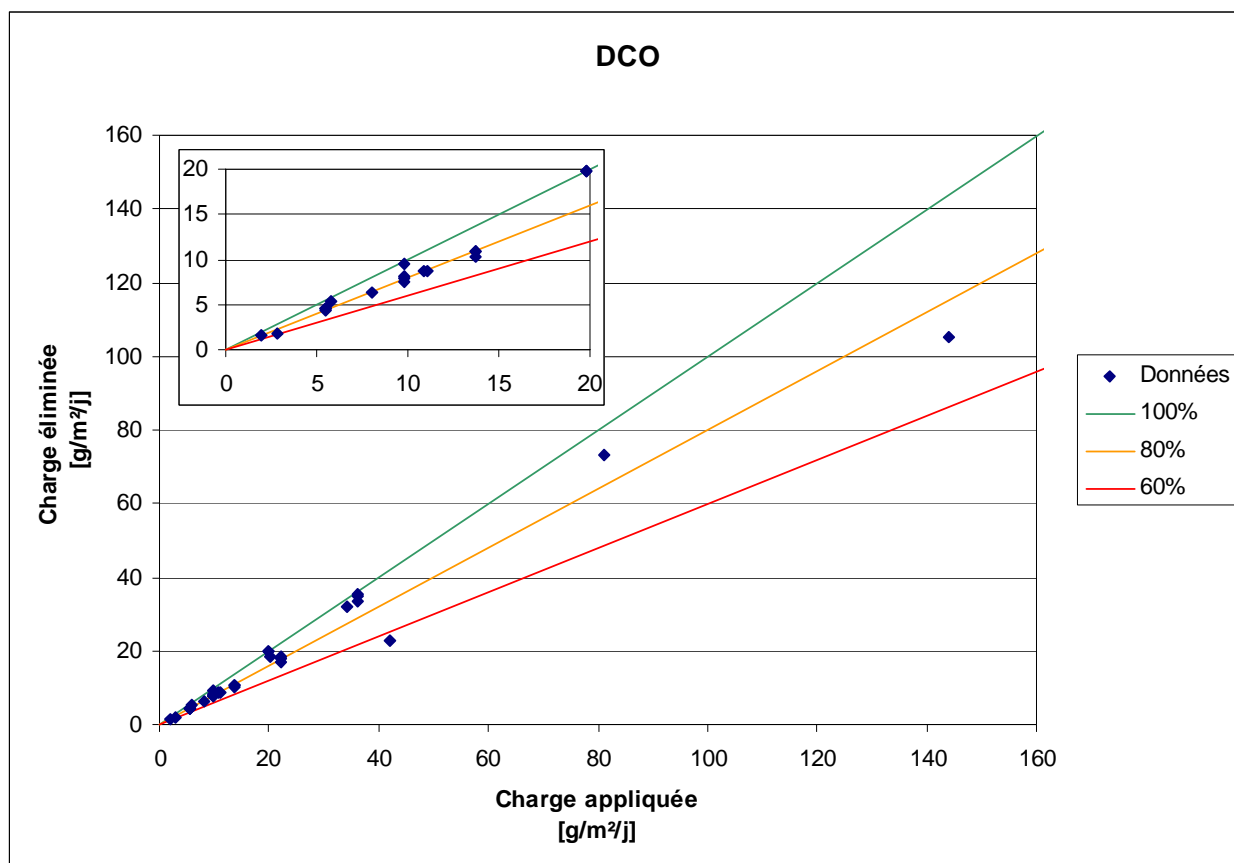


Figure 19 : Charges appliquées vs charges éliminées pour la DCO des FPv

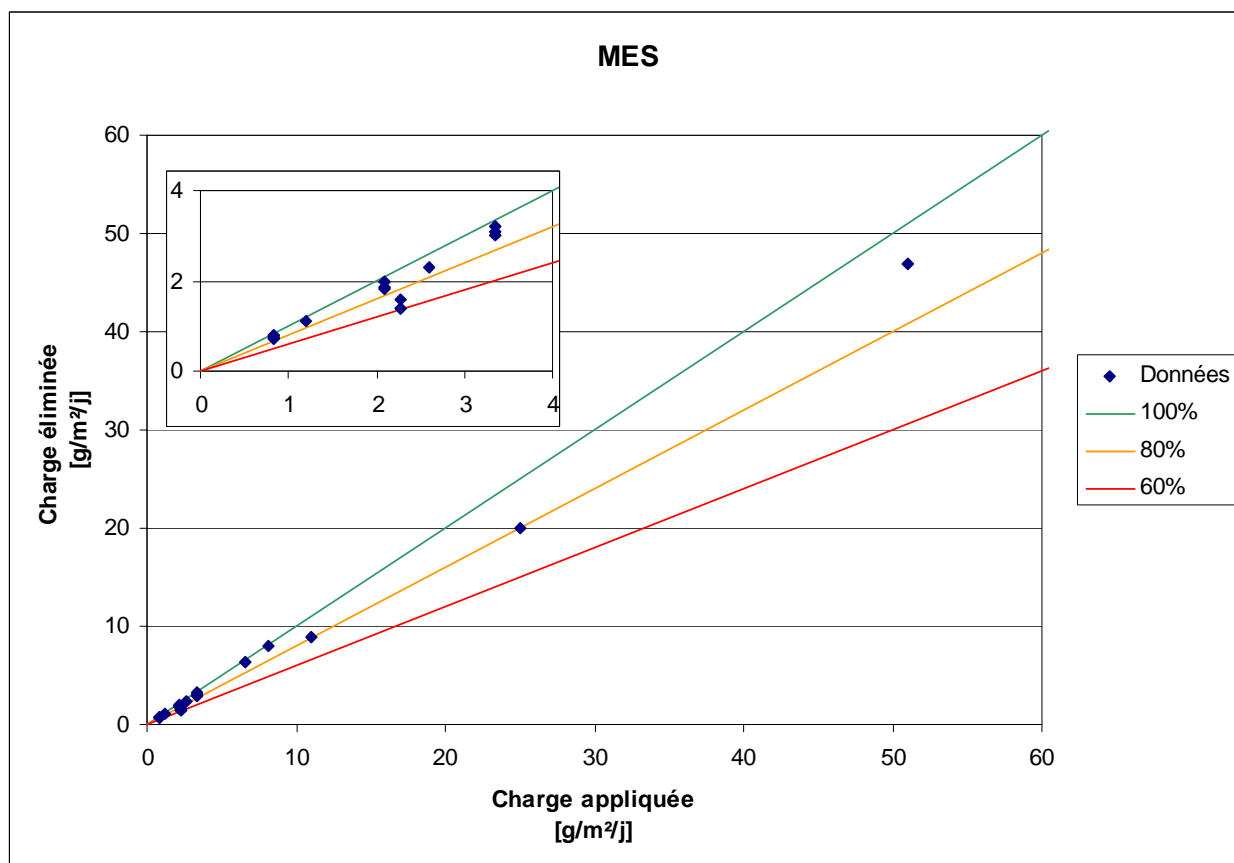


Figure 20 : Charges appliquées vs charges éliminées pour les MES des FPv

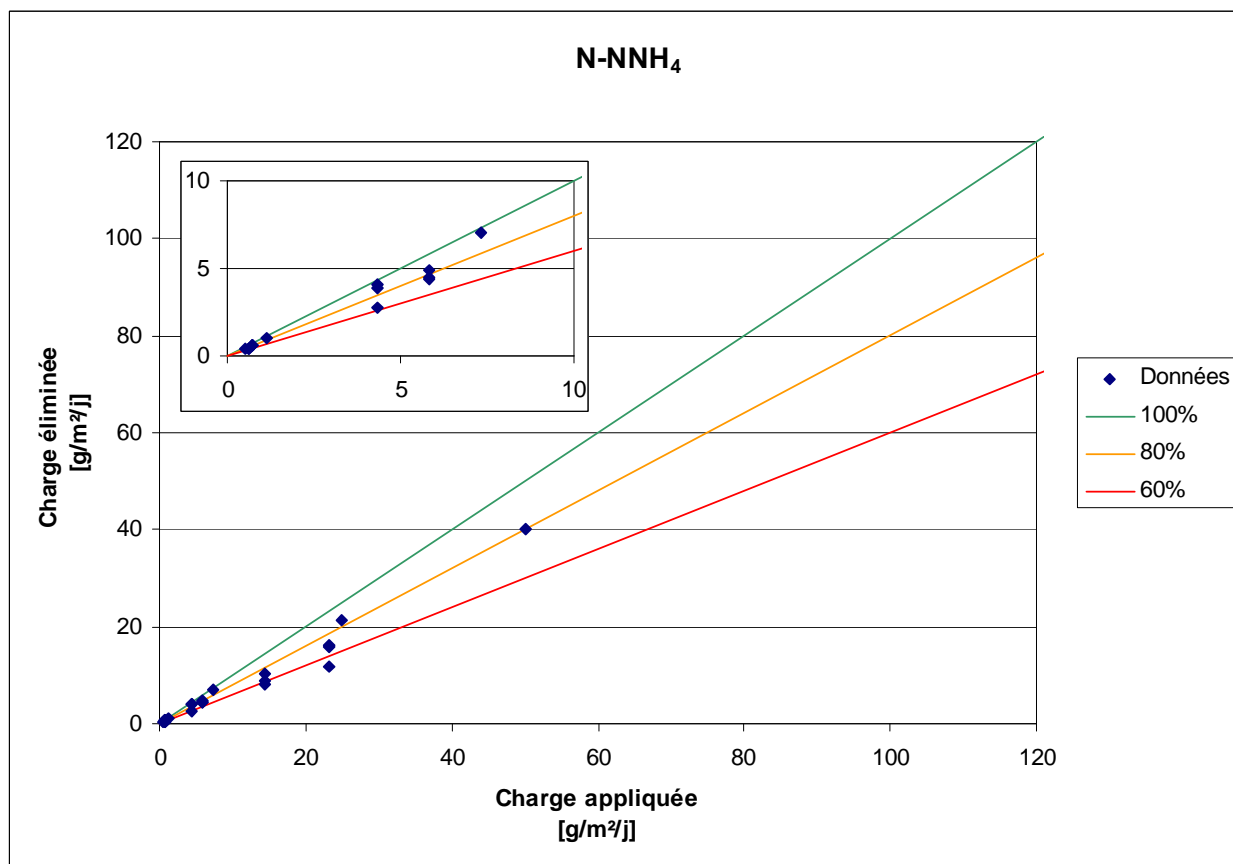


Figure 21 : Charges appliquées vs charges éliminées pour l'ammonium des FPv

La Figure 22 propose de représenter les charges appliquées au FPv en fonction des concentrations mesurées en sortie de filtre. Les seuils de rejet réglementaires issus de la DERU sont également mentionnés. On remarque que la qualité du rejet n'est pas fonction de la charge appliquée sur le filtre et qu'ainsi l'application de fortes charges (type FPv eaux usées brutes ou grande charge hydraulique) n'empêche pas l'atteinte des seuils de rejet en vigueur.

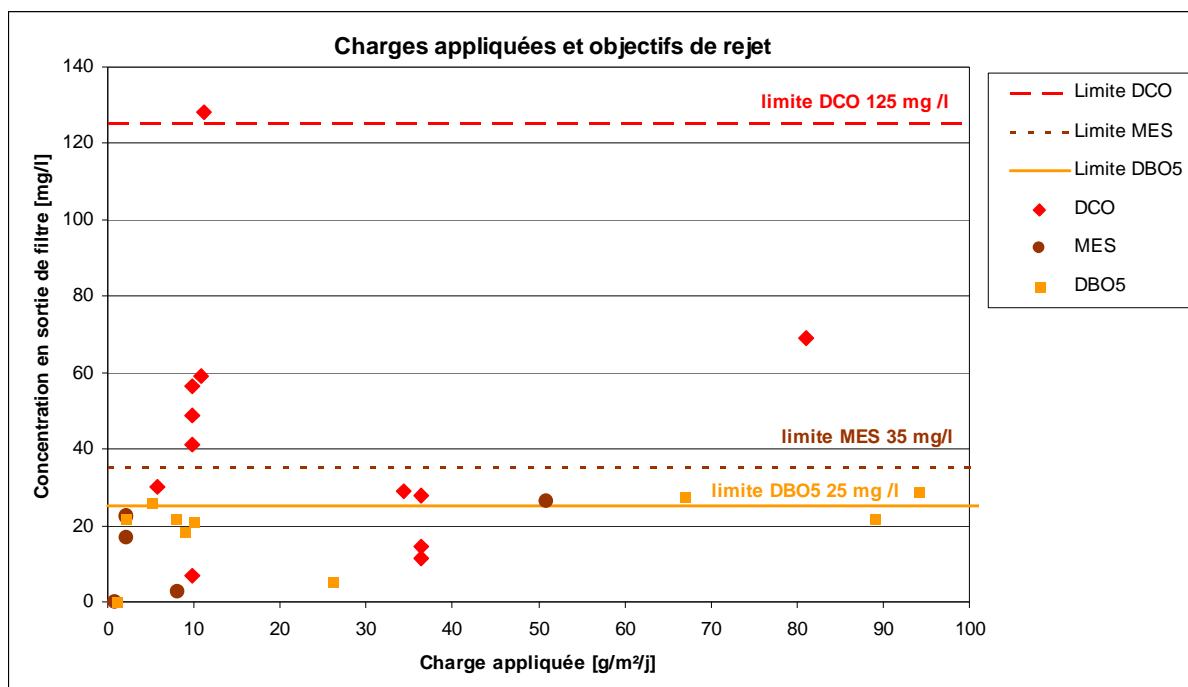


Figure 22 : Charges appliquées vs concentrations en sortie pour les FPv

En conclusion, seules deux expérimentations (Esser *et al.*, 2010; Melián *et al.*, 2010) témoignent de l'usage de FPv eaux usées brutes dans la littérature dont une conduite par l'équipe d'Irstea à Mayotte. Ces expérimentations présentent de très bons rendements.

La majorité des expériences dans les tropiques utilisent des FPv avec traitement en amont, la filière complète de traitement nécessite ainsi une gestion des sous-produits régulière.

L'application de fortes charges sur le filtre ne semble pas compromettre la qualité du rejet.

3.4.2. Filtres à écoulement horizontal

Les expériences FPh dans la littérature tropicale sont plus nombreuses et témoignent de multiples configurations en présentant des traitements en amont différents (qualité d'effluents différente), des matériaux variés mais surtout des modes d'alimentation différents.

3.4.2.1. Charges appliquées sur les FPh

Tout comme pour les FPv, une comparaison des charges appliquées aux FPh est engagée. Les données présentées (Tableau 14) sont sensiblement comparables aux charges appliquées sur les FPv après traitement primaire. Les valeurs extrêmes proviennent d'étude comparant des effluents issus de lixiviats de décharge aux effluents domestiques.

Tableau 14 : Charges appliquées sur les FPh (données bibliographiques)

| | DCO | MES | N-NH ₄ | PT |
|-----------------------|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | <i>g O₂/m²/j</i> | <i>g/m²/j</i> | <i>g/m²/j</i> | <i>g/m²/j</i> |
| Minimum | 0,8 | 0,4 | 0,6 | 0,1 |
| Premier quartile | 7,6 | 2,3 | 1,2 | 0,3 |
| Médiane | 12,4 | 4,7 | 2,2 | 0,6 |
| Troisième quartile | 17,0 | 22,0 | 4,3 | 1,0 |
| Maximum | 92,0 | 227,5 | 99,8 | 45,8 |
| Ecart interquartile | 9,3 | 19,7 | 3,1 | 0,6 |
| Valeurs extrêmes max. | 0 | 1 | 1 | 0 |
| Valeurs extrêmes min. | 0 | 0 | 0 | 0 |

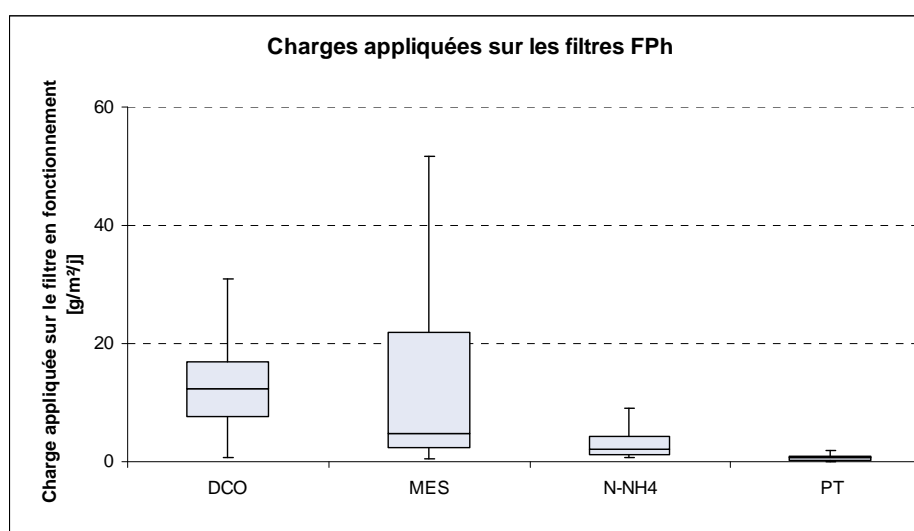


Figure 23 : Charges appliquées sur les FPh

En revanche si on compare les charges appliquées aux charges éliminées des FPh (Figure 24, Figure 25 et Figure 26) , on constate une tendance vers les limites des filtres : pour la DCO, les rendements épuratoires semblent chuter au delà de 30 g DCO/m²/j. Pour les MES, la limite semble atteinte au delà de 15 g MES/m²/j.

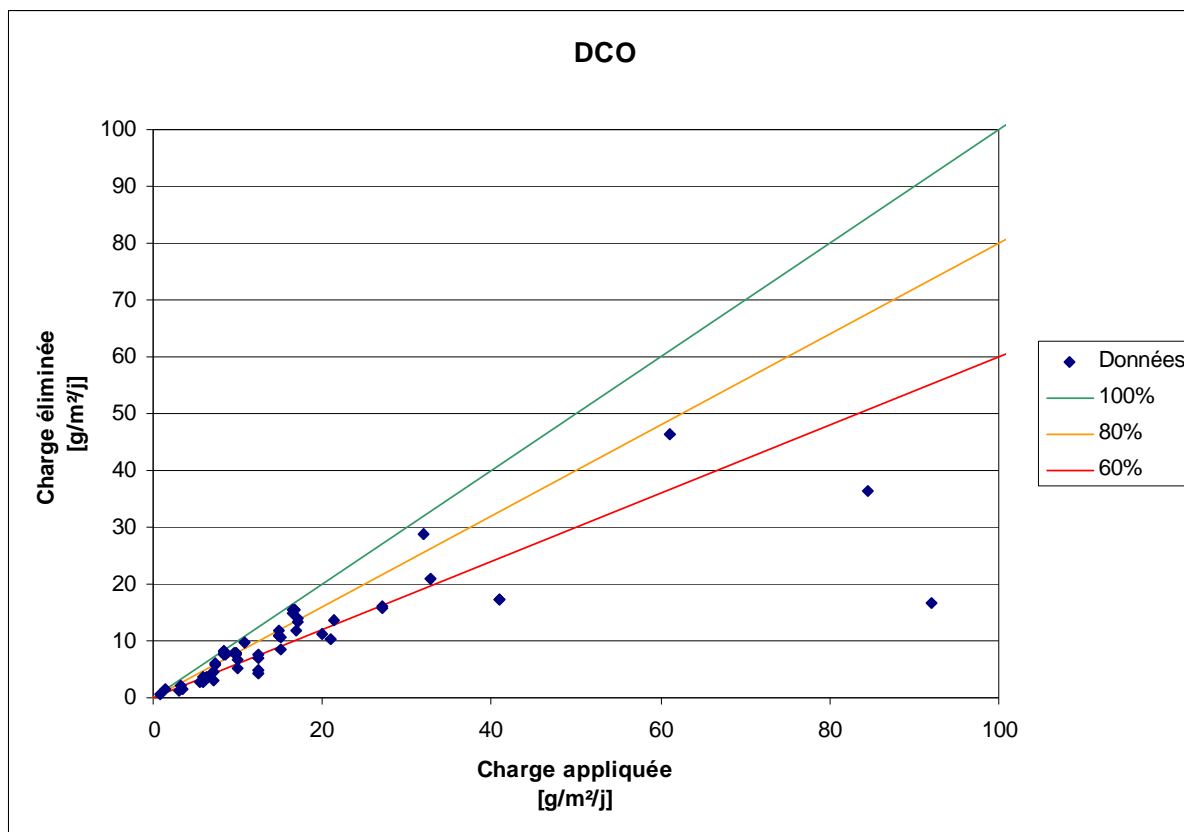


Figure 24 : Charges appliquées vs charges éliminées pour la DCO des FPh

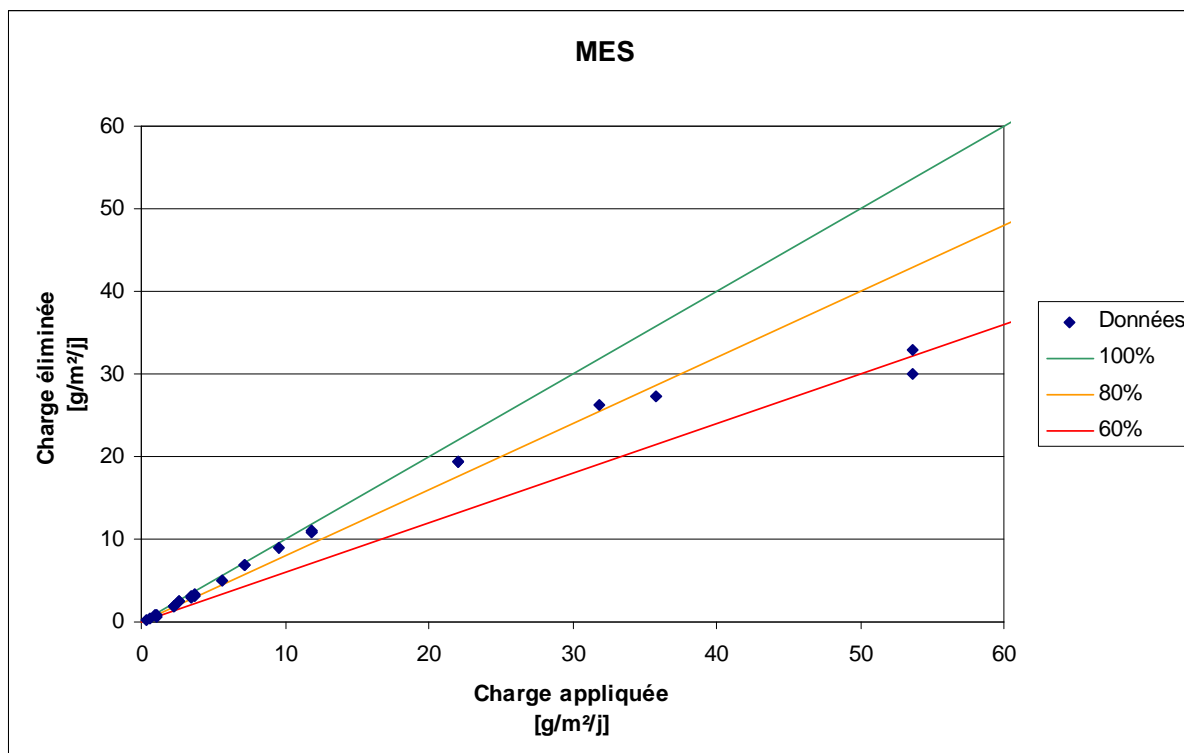


Figure 25 : Charges appliquées vs charges éliminées pour les MES des FPh

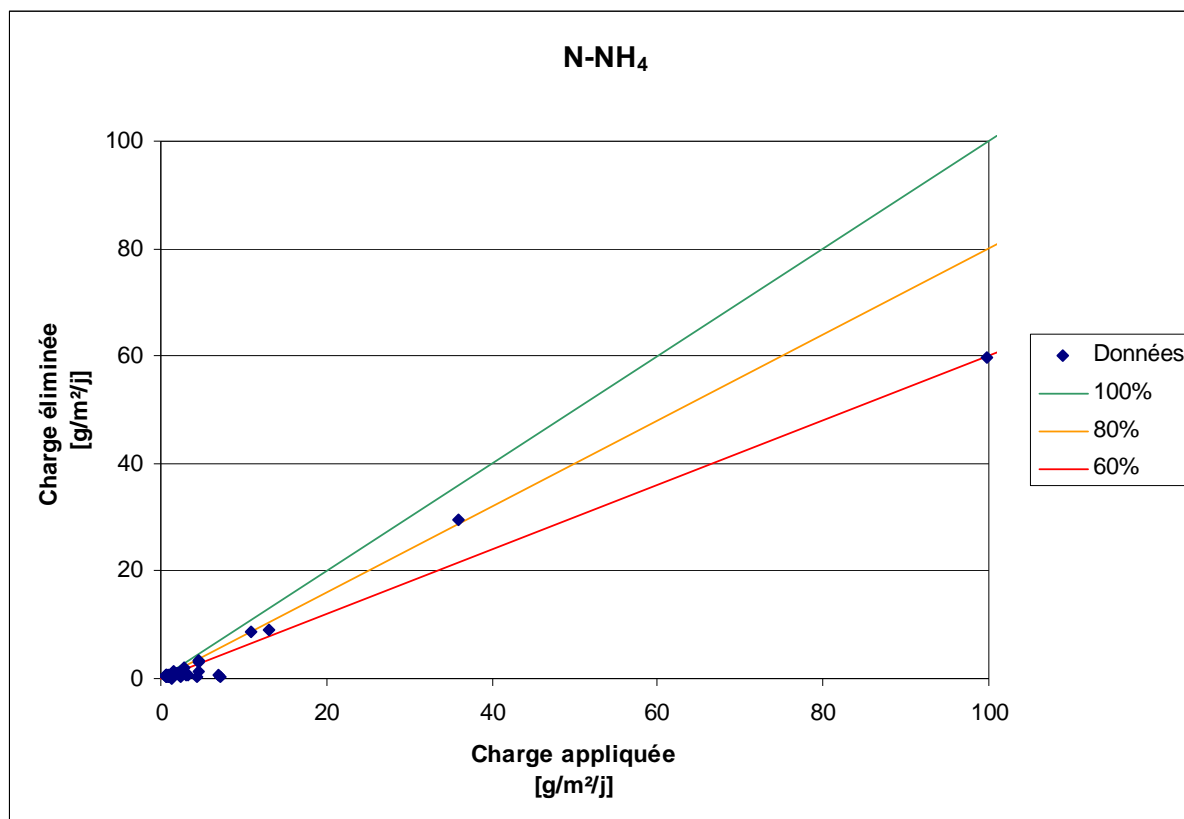


Figure 26 : Charges appliquées vs charges éliminées pour l'ammonium des FPh

Concernant la Figure 26, les abattements représentés en ammonium semblent très élevés par rapport au potentiel de nitrification limité des FPh. Les précautions édictées en amont du traitement de données sont particulièrement applicables à cette figure. En effet, les expériences de FPh étudiées mettent en valeur des modes d'alimentation des filtres très variables : alimentation continue, alimentation par bâchées avec des niveaux d'effluents fixes ou variables. Les conditions anaérobies généralement associées au FPh, sont étroitement liées au maintien du niveau d'effluents dans les filtres. Les variations de niveaux au sein du massif ont tendance à favoriser la réoxygénation des filtres, ce qui peut permettre la mise en place de processus de nitrification.

3.4.2.2. Temps de séjour et évapotranspiration

Une caractéristique intéressante des FPh est le temps de séjour théorique de l'effluent dans le filtre calculé par l'équation suivante (R. H. Kadlec and Knight, 1996) :

$$\tau = \frac{A \varepsilon h}{Q} \quad \text{Équation 3: Temps de séjour théorique dans le FPh}$$

Avec,

ζ le temps de séjour théorique de l'effluent dans le filtre en jour ;

A la surface du filtre en m^2 ;

ε la porosité du matériau sans unité ;

h la hauteur d'eau dans le filtre ;

Q le débit de l'effluent en m^3/j .

Les expériences présentent un temps de séjour médian de l'effluent dans le filtre d'environ **4 jours** (Figure 27).

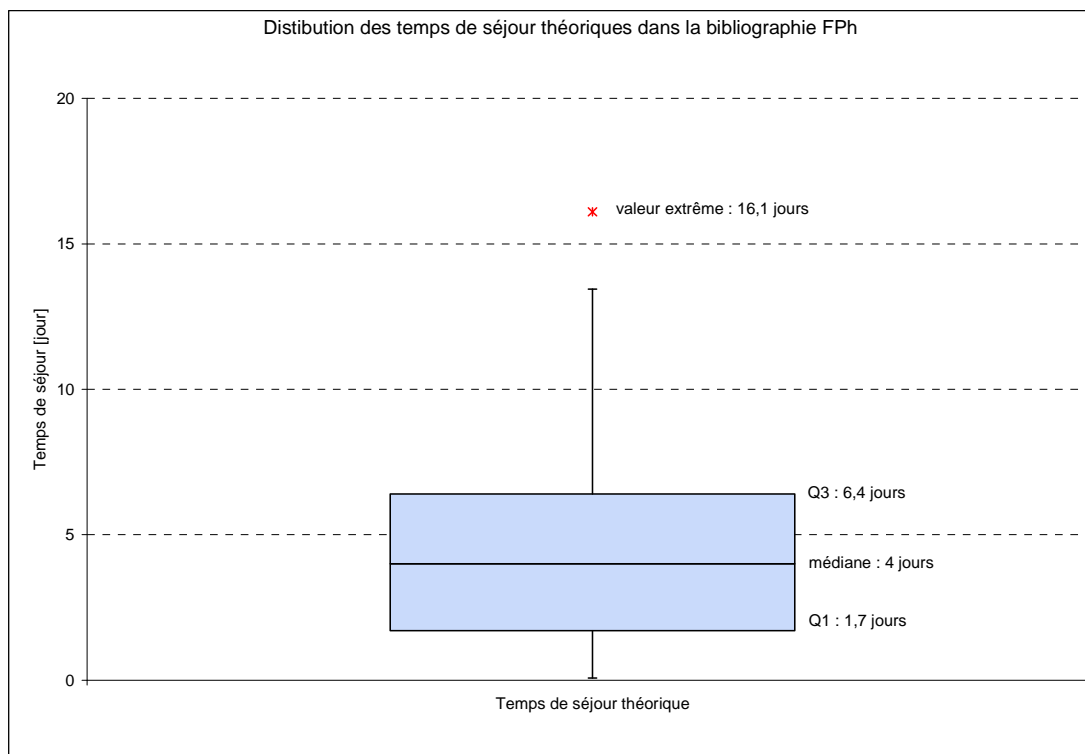


Figure 27 : Distribution des temps de séjour pour les FPh

L'évapotranspiration joue un rôle important lors des saisons chaudes (été des zones tempérées, zone tropicale) en augmentant le temps de séjour dans le filtre (Chazarenc *et al.*, 2003). A l'inverse de fortes précipitations ont tendance à diluer l'effluent dans le filtre et diminuer le temps de séjour. Dans le contexte des pays arides où la ressource en eau est très limitée, certains auteurs s'intéressent à diminuer l'évapotranspiration de l'effluent en sélectionnant des végétaux avec une biomasse plus faible et en diminuant le temps de séjour de l'effluent dans le filtre (Ayaz, 2008; Butler, 1990; El Hamouri *et al.*, 2007).

3.4.2.3. Constantes de dégradation et dimensionnement

Une étude des constantes de dégradation k_{DCO} , k_{DBO5} et k_{NH4} montre une trop grande variabilité des résultats ne pouvant aboutir à des raisonnements sérieux. Ces résultats confirment les imprécisions associées au modèle k-C* préconisé pour le dimensionnement des FPh (paragraphe 2.1.2).

3.4.3. Comparaison FPv et FPh

3.4.3.1. Charges hydrauliques et rendements épuratoires

Une comparaison des données recueillies pour les FPh et FPv est proposée et permet d'identifier un ordre de grandeur des charges hydrauliques appliquées sur les filtres plantés compris entre 0,01 et 0,2 m/j (plus de 90 % des données tous filtres confondus) (Figure 28). Il est intéressant de remarquer la différence entre les charges hydrauliques appliquées aux FPv eaux usées brutes français de 0,104 et 0,501 m/j à Mayotte sans et avec recirculation respectivement, et de 0,37 m/j préconisée en métropole. Cette observation conforte les différences de conception entre les FPv classique et FPv eaux usées brutes.

Les fortes charges hydrauliques appliquées au FPh résultent d'expérimentations pour le traitement d'eaux usées très diluées.

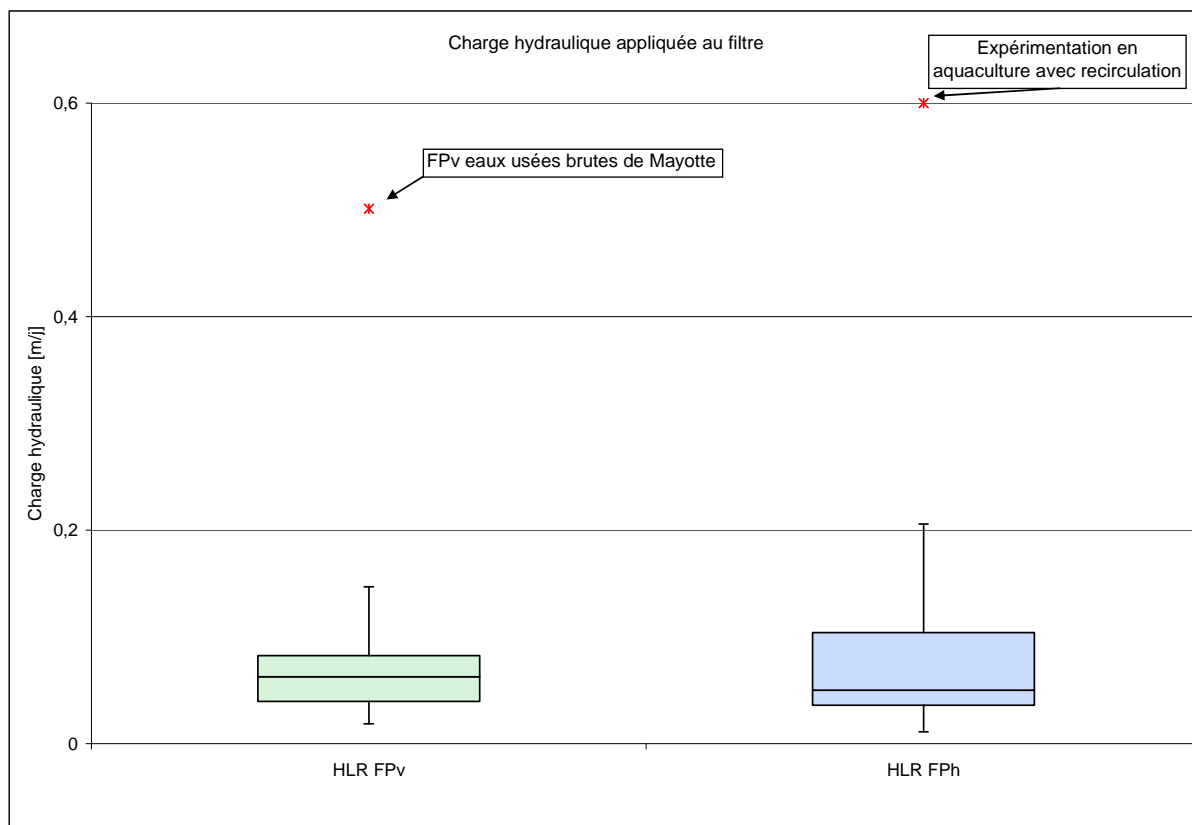


Figure 28 : Charges hydrauliques appliquées aux FPv et FPh
(HLR : Hydraulic Loading Rate en m/j)

Une étude des rendements épuratoires des FPv et FPh de la littérature tropicale toutes expérimentations confondues, met en avant une stabilité des abattements des paramètres carbonés et matières en suspension (> 50 %) malgré une grande variabilité de conception des procédés (Figure 29). Les FPv semblent plus robustes sur ces paramètres que les FPh.

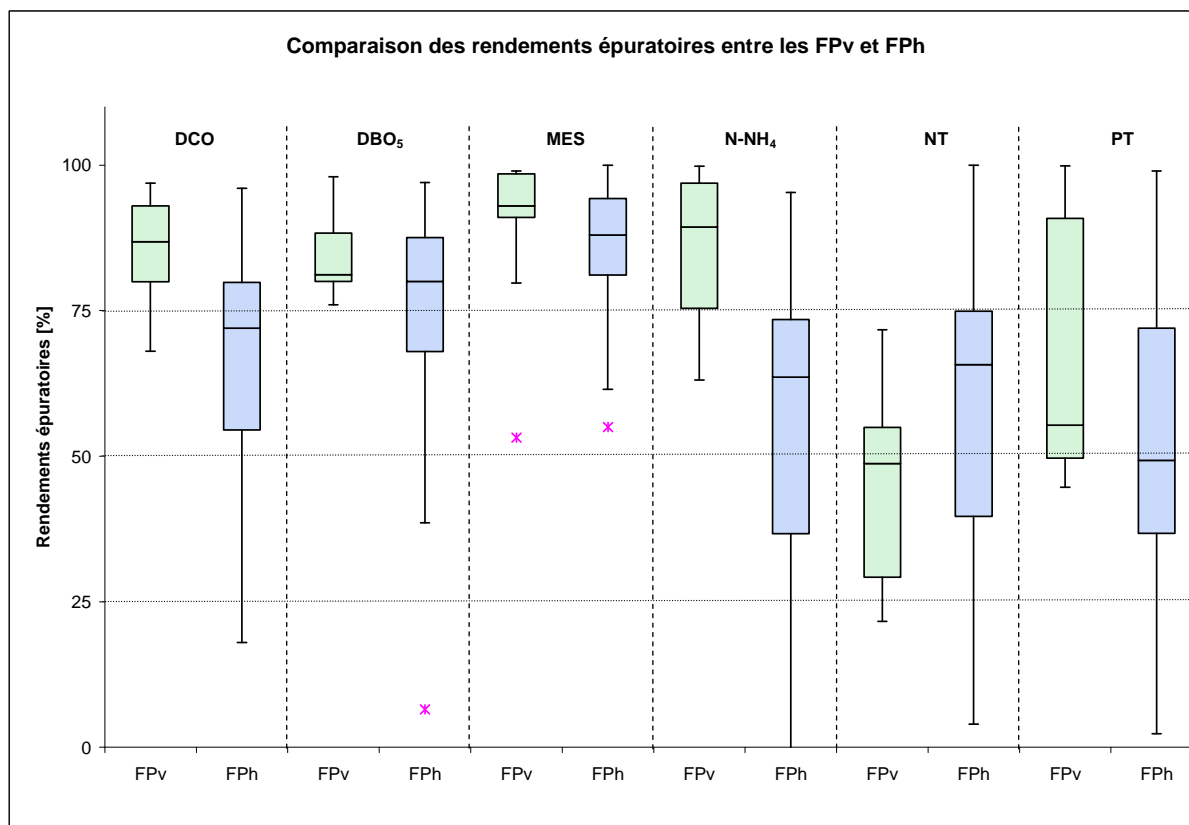


Figure 29 : Rendements épuratoires des FPv et FPh

Pour l'abattement des nutriments (azote et phosphore), les données sont plus étalées. Cependant, on peut remarquer que les rendements en ammonium sont globalement plus élevés pour les FPv, procédés propices à la nitrification et plus faibles en azote global, les FPv étant plus limités que les FPh pour la dénitrification.

La dégradation du phosphore étant associée principalement à des mécanismes physiques et de maturité du système, il paraît cohérent d'obtenir une grande variabilité des rendements épuratoires sur ce paramètre.

Malgré l'hétérogénéité des conditions d'expérimentations, les rendements sont satisfaisants sur les paramètres carbonés et matières en suspension.

3.4.3.2. Etude des concentrations

Une étude des concentrations en entrée et sortie des FPh et FPv étudiés permet d'estimer les ordres de grandeur des qualités d'effluents appliquées au filtre planté et les concentrations en sortie.

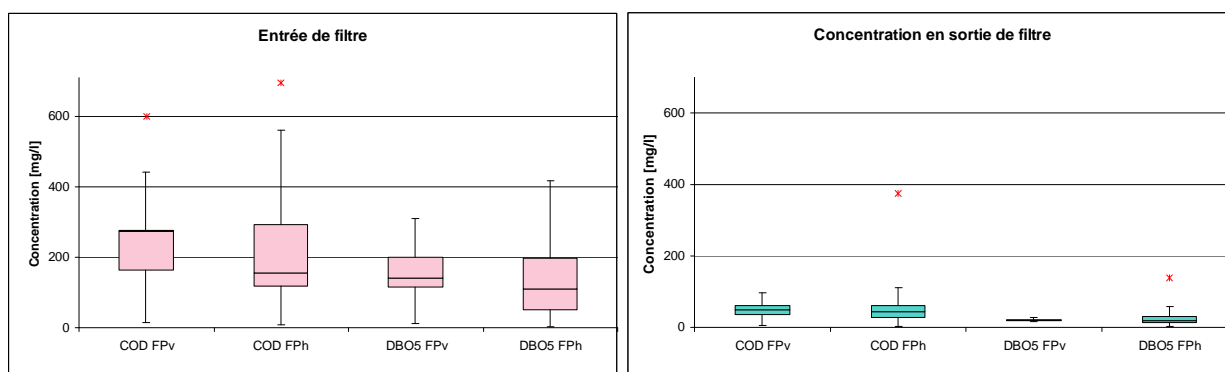


Figure 30 : Concentration en entrée et sortie des FPv et FPh en mg/L

Les valeurs extrêmes en **DCO et DBO₅** (Figure 30) relèvent d'expérimentations incluant des effluents d'une zone artisanale comparables à des effluents industriels (Philippi *et al.*, 1999) et lixiviats de décharge (Sawattayothin and Polprasert, 2006) pour les FPh ainsi que d'effluents agricoles pour les FPv (Kantawanichkul *et al.*, 1999). Seule une valeur de concentration en DBO₅ (Philippi *et al.*, 1999) compromet la conformité des résultats aux seuils de rejet réglementaires.

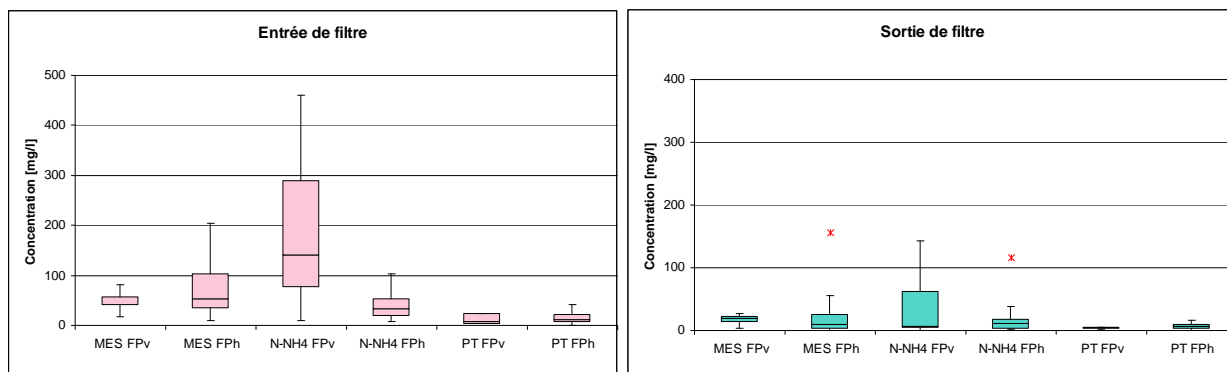


Figure 31 : Concentration en entrée et sortie de FPv et FPh en mg/L

Les valeurs extrêmes en **N-NH₄** (Figure 31) pour les FPh témoignent d'effluents chargés en ammonium en entrée de filtre qui n'ont pu subir de nitrification en conditions saturées des FPh (Agudelo *et al.*, 2010; Dan *et al.*, 2011).

Pour les FPv, certaines publications se sont intéressées (Kantawanichkul *et al.*, 2009) à tester la capacité de dégradation de l'ammonium par les FPv et ce notamment pour des effluents très chargés en azote. En conséquence, la distribution des concentrations en ammonium en sortie de FPv est plus étalée mais la majorité des valeurs sont inférieures à 7 mg/L de N-NH₄.

Les résultats des concentrations en **phosphore** (Figure 31) sont très variables avec des concentrations en phosphore total en sortie variant de 0,1 à 15,1 mg/L. Cette observation témoigne des expérimentations avec des effluents synthétiques et agricoles.

D'autres expérimentations ont effectué un suivi des **pathogènes** dont les résultats sont présentés ci-dessous (

Tableau 15). Elles témoignent d'un abattement de 2 unités log pour les coliformes fécaux et totaux et E. coli. Les résultats issus des FPv sont à considérer avec précautions au vue du nombre limité de publications.

Tableau 15 : Suivi des pathogènes

FPh

| Pays | Type d'effluents | Type d'effluents | Référence | Abattement coliformes fécaux | Abattement coliformes totaux | Abattement E. coli | Temps de séjour théorique |
|------------|------------------|---|--|------------------------------|------------------------------|--------------------|---------------------------|
| | | | | unité log | unité log | unité log | jour |
| Colombie | Macrocosme | domestique (campus) | Williams <i>et al.</i> , 1999 | | | 2,0 | <1 |
| Brésil | Macrocosme | domestique | Dornelas <i>et al.</i> , 2009 | | | 1,6 | <1 |
| Costa Rica | Microcosme | eaux grises | Dallas <i>et al.</i> , 2005 | 4,5 | | | 5-10 |
| Cuba | Macrocosme | domestique | Garcia-Armisen <i>et al.</i> , 2008 | | 2,5 | 2,42 | |
| Mexique | Micro/Mésocosme | domestique (STEU) | Zurita <i>et al.</i> , 2006, 2011 | 1,1 | 3 | | 3-5 |
| Mexique | Mésocosme | domestique | Zurita <i>et al.</i> , 2009 | | 1,4 | | 3-5 |
| Kenya | Macrocosme | domestique (campus) | Mburu, 2008 | 1,1 | | | |
| Australie | Macrocosme | domestique (école) / eaux grises | Davison <i>et al.</i> , 2001 | <1 | | | 5-10 |
| Australie | Macrocosme | domestique | Davison <i>et al.</i> , 2005 | 1,9 | | | 1-3 |
| Inde | Macrocosme | domestique | Ahmed <i>et al.</i> , 2008 | 4,3 | 1,9 | | 1-3 |
| Inde | Macrocosme | domestique | Tomenko <i>et al.</i> , 2006 | 1,3 | 1,5 | | 5-10 |
| Sri Lanka | Macrocosme | domestique (campus) | Jinadasa <i>et al.</i> , 2006 | 1,0 | | | <1 |
| Thaïlande | Mésocosme | domestique (campus) / lixiviat de décharge dilué | Sawattayothin <i>et al.</i> , 2006, 2007 | 0,4 0,9 1,3 2,4 | 0,6 1,0 1,2 2,5 | | <1 1-3 3-5 5-10 |
| moyenne | | | | 2 | 2 | 2 | 4 |

FPv

| Pays | Echelle | Type d'effluents | Référence | Abattement coliformes fécaux | Abattement coliformes totaux | Abattement E. coli | Temps de séjour théorique |
|-----------------------|------------|--------------------|-----------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------|---------------------------|
| | | | | unité log | unité log | unité log | jour |
| Systèmes non colmatés | | | | | | | |
| Mexique | Microcosme | domestique (STEU) | Zurita <i>et al.</i> , 2009, 2011 | | 1,8 | | - |
| Mexique | Mésocosme | domestique (STEU) | Zurita <i>et al.</i> , 2009, 2011 | | 1,7 | | - |
| Népal | Macrocosme | eaux grises | Shrestha <i>et al.</i> , 2001 | | | 5,9 | - |
| Indonésie | Macrocosme | agricole | Kurniadie <i>et al.</i> , 2011 | | 2,8 | | - |
| Indonésie | Macrocosme | domestique (foyer) | Kurniadie <i>et al.</i> , 2000 | 4,8 | | | - |
| moyenne | | | | 5 | 2 | 6 | - |

3.5. Conclusion et synthèse des manques

L'adaptation des procédés de traitement des eaux usées domestiques au contexte tropical soulève de nombreux enjeux. La zone tropicale est très souvent associée à des contraintes de développement pour des pays dont les moyens financiers accordés à la problématique assainissement sont très limités. Cependant, cette généralisation cache de nombreux cas particuliers et révèle une très grande hétérogénéité des pratiques culturelles de l'eau.

L'état de l'art présenté ci-dessus n'est, en réalité, qu'un aperçu des expérimentations scientifiques conduites dans la zone tropicale. Malheureusement, la majorité des pays de ces régions ne dispose pas de financements suffisants pour mener ces opérations. Pourtant ces régions sont, pour la plupart, sujettes à un développement rapide et particulièrement exposées aux risques sanitaires ; les enjeux sont importants. Cette étude vise à collecter les expériences engagées. Cependant, les différences de protocoles de prélèvement, d'analyses ou de mécanismes des procédés limitent les comparaisons.

On notera que les publications scientifiques s'inscrivent dans une démarche d'innovation expérimentale en vue d'améliorer les procédés existants. C'est pourquoi, la confrontation de ces expériences s'avère délicate, les procédés étant spécifiquement différents. Les données issues de « cas concrets » sont rarement diffusés excepté pour les projets d'accompagnement par des ONG, mais dans ce cas les données techniques ne sont que faiblement détaillées. Pour les constructions privées, les analyses et données techniques sont très souvent protégées. Pour cette raison, il est difficile d'établir une photographie des procédés actuellement implantés et de leurs caractéristiques techniques.

Pourtant, l'exploitation des données publiées permet déjà d'esquisser quelques conclusions qui permettront de définir les choix expérimentaux de la dernière partie.

3.5.1. Climat

Le climat joue un rôle prépondérant dans cette problématique d'adaptation de procédé.

L'absence d'hiver dans la zone tropicale renforce le potentiel de ces techniques et représente ainsi un caractère positif à l'expérimentation tropicale. En revanche, les fortes précipitations du climat tropical présentent un caractère limitant.

L'étanchéité des réseaux (intrusion d'eaux marines, de nappe, ou de ruissellement par les tampons non étanches) ainsi que de mauvais branchements peuvent engendrer une fluctuation importante des charges hydrauliques sur la station de traitement et ce, particulièrement dans le contexte tropical.

Cependant, les charges hydrauliques présentées dans la bibliographie varient d'un facteur 20 sans engendrer de réductions importantes des rendements sur les paramètres principaux (DCO, DCO₅ et MES). Mais au vu du nombre de caractéristiques techniques influençant sur ces paramètres et de l'imprécision des données, il est difficile d'émettre une corrélation directe entre les charges hydrauliques appliquées et les rendements épuratoires. Un suivi inter saisonnier de stations expérimentales est préconisé pour mettre en valeur ce phénomène.

3.5.2. Conception

Les expérimentations par FPh sont plus répandue que les expériences FPv. Cette remarque peut être attribuée au fait que la technique de FPh est plus ancienne d'une part, mais aussi qu'elle nécessite moins de maintenance pour une technicité plus souple. Cependant, les FPh sont plus sensibles au colmatage avec une emprise au sol plus importante et semblent moins performants pour le traitement des paramètres principaux (matière organique et en suspension) et l'ammonium. Ainsi, les FPv seront retenus comme plus intéressants que les FPh et ceci plus particulièrement pour le modèle français (eaux usées brutes) qui s'affranchit d'une étape préliminaire de traitement permettant un co-traitement des boues. L'augmentation des charges organiques sur le filtre ne semble pas affecter les rendements épuratoires. Cette observation conforte l'intérêt d'utiliser le procédé FPv eaux usées brutes.

Seules de rares expérimentations témoignent de ce procédé dans le contexte tropical. Il paraît nécessaire de développer cette technique.

Les matériaux utilisés dans la littérature sont variés, suggérant une adaptabilité souple du procédé. Cependant, une attention particulière est préconisée sur la teneur en fines des matériaux responsable du colmatage, vigilance à soutenir autant à l'achat des matériaux qu'au moment de la construction.

Les espèces végétales citées dans la bibliographie sont nombreuses confortant le potentiel d'adaptation du procédé. En revanche, les charges appliquées sur les FPv eaux usées brutes étant généralement plus élevées et le rôle mécanique du végétal sur le fonctionnement du filtre plus important, ces expériences ne sont pas forcément transposables à ce modèle de conception. Le choix de différents végétaux sur des filtres en parallèle est préconisé pour les expérimentations FPv eaux usées brutes afin de tester de nouveaux végétaux sans compromettre le fonctionnement de tous les filtres.

3.5.3. Intégration

Les retours d'expérience de terrain témoignent d'un manque de rigueur dans l'exploitation de ces procédés induisant des dysfonctionnements. L'établissement de fiches de suivis précises pour l'exploitation des filtres plantés est nécessaire pour leur bon fonctionnement. Des formations ainsi que des présentations des techniques sont conseillées.

La considération des pratiques culturelles par le constructeur semble importante pour l'intégration et le respect de l'installation par les populations environnantes.

3.5.4. Manques

La connaissance des effluents bruts par régions et/ou communautés est très limitée autant par sa probable hétérogénéité que par sa qualité moyenne.

Au vu des données recueillies et pour un meilleur développement des techniques, il semble important de souligner l'intérêt de fiabiliser les données de suivi ainsi que d'effectuer des suivis interannuels. Les

protocoles de prélèvements (prélèvement ponctuel ou 24h), de transport et d'analyses doivent impérativement être précisés et au mieux harmonisés à l'échelle internationale.

Le suivi des pathogènes dans les publications n'est pas suffisant pour préciser le potentiel des filtres plantés. Il paraît désormais incontournable pour évaluer précisément le potentiel de ce procédé pour de nouvelles applications dont la réutilisation d'effluents traités, l'impact des rejets sur les milieux contraints (zone de baignade, conchyliculture, ...) et/ou valorisation du végétal.

L'impact des filtres plantés sur la dynamique des populations de moustiques n'est pas étudié pour les FPv. Des partenariats sont possibles pour vérifier leur implication dans la création de nouveaux gîtes larvaires même si tout risque devra être éloigné dans le modèle de conception.

Le potentiel de valorisation de la biomasse végétale des filtres est une réflexion intéressante qui doit être inscrite dans le contexte réglementaire sanitaire français.

L'édition de guides d'exploitation et la proposition de formation du personnel en charge de l'exploitation des filtres plantés devraient être systématique compte tenu des risques de colmatage dus à une maintenance non régulière et rigoureuse.

L'ensemble des conclusions et recommandations sont désormais à inscrire dans le contexte tropical des DOM en vue de développer cette technique qui paraît appropriée à ces territoires. Pour ce ; un premier point sera présenté sur les expériences conduites à Mayotte afin de proposer des choix expérimentaux précis pour l'établissement de nouvelles stations pilotes.

4. Expérience des DOM et choix expérimentaux

4.1. Démarrage des expérimentations, le cas de Mayotte

4.1.1. Contexte

Le transfert des techniques de traitement par filtres plantés dans les DOM a initialement débuté en 2005 avec la construction de deux stations de taille réelle à vocation expérimentale à Mayotte, l'une à écoulement horizontal et l'autre à écoulement vertical avec application d'eaux usées brutes. La construction de ces deux ouvrages fut le fruit de la collaboration du SIEAM (Syndicat Intercommunal d'Eau et d'Assainissement de Mayotte), la SINT (Société d'Ingénierie Nature et Technique) et de l'équipe épuration d'Irstea (Alain Liénard) avec l'appui du MEEDAT (Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire).

Ci-dessous (Tableau 16) sont présentées les principales caractéristiques des stations expérimentales de Mayotte.

Tableau 16 : Caractéristiques techniques des stations expérimentales à filtres plantés à Mayotte

| | Totorossa | Hachenoua |
|-----------------------------|---|---|
| Commune | Dzaoudzi-Labattoir | Tsingoni |
| Localisation | Petite Terre, Mayotte | Grande Terre, Mayotte |
| Date de mise en eau | octobre 2005 | avril 2006 |
| Constructeur | SINT | SINT |
| Propriétaire | SIM | SIM |
| Exploitant | SIEAM | SIEAM |
| Traitement amont | décanteur-digesteur | - |
| Type d'écoulement | FPh | FPv |
| Nombre logements | 25 logements | 26 logements |
| Charge nominale | 150 EH | 160 EH |
| Charge réelle | 74 EH | 50 EH |
| Nombre d'étage | 1 | 1 |
| Nombre de lits/étage | 3 | 2 |
| Surface lit | 150 | 81 |
| Surface totale | 450 | 162 |
| Matériaux | 1-2 cm 4/6 0,70 cm pouzzolane | 80 cm 4/6 15 cm 6/10 15 cm 20/40 |
| Végétaux | <i>Typha augustifolia</i> <i>Thysanolaena maxima</i> | <i>Typha augustifolia</i> <i>Thysanolaena maxima</i> |
| Recirculation | non | oui |

4.1.2. Résultats des premiers suivis

Les faibles charges constatées en entrée de chacun des filtres ont remis en cause le dimensionnement initial ; des adaptations ont dû être mises en place. Les détails des charges appliquées et éliminées pour chacune des stations sont détaillés en Annexe 4.

4.1.2.1. Hachenoua

Afin de respecter les objectifs expérimentaux, seul un lit du FPv d'Hachenoua est actuellement utilisé, ce dernier étant compartimenté en deux permettant une alternance de 7 jours d'alimentation puis 7 jours de repos. Les rendements présentés dans le Tableau 17 mettent en valeur de très forts abattements.

Tableau 17 : Bilan des campagnes d'analyse 2008-2010 de la station FP d'Hachenoua à Mayotte (SIEAM, 2010)

| | |
|---|---------------------------------------|
| Charge spécifique (base hydraulique de 150L/EH) | 1,4 m ² /EH |
| Charge spécifique (base organique de 120gDCO/EH) | 1,5 m ² /EH |
| Charge spécifique en DCO sur l'ensemble des filtres | 81 g DCO/m ² /j |
| Charge hydraulique sur le filtre en fonctionnement | 0,50 m/j |
| Energie consommée | 0,59 kWh/kg DBO ₅ éliminé* |
| Rendements | 91% DCO |
| | 95% DBO |
| | 93% MES |
| | 95% N Kjeldahl |
| | 55% NGL |

*environ 2 kWh/kg DBO₅ en boues activées

4.1.2.2. Totorossa

Initialement, le FPh de Totorossa prévoyait un décanteur-digester en amont puis trois FPh parallèles de 150 m² chacun afin de tester différentes espèces végétales. Compte-tenu des faibles charges en entrée, seuls deux lits sont réellement en service et fonctionnent en série (Tableau 18).

Tableau 18 : Bilan des campagnes d'analyse 2008-2010 de la station FPh de Totorossa à Mayotte (SIEAM, 2010)

| | |
|---|--|
| Charge spécifique (base hydraulique de 150L/EH) | 3,9 m ² /EH (1er filtre) 7,7 m ² /EH (total) |
| Charge spécifique (base organique de 120gDCO/EH) | 4 m ² /EH (1er filtre) 8,1 m ² /EH (total) |
| Charge spécifique en DCO sur le 1er filtre après décanteur primaire | 15 g DCO/m ² /j |
| Charge spécifique en DCO sur le 2ème filtre | 2,99 g DCO/m ² /j |
| Charge hydraulique sur chacun des filtres | 0,05 m/j |
| Energie consommée | 3,51 kWh/kg DBO ₅ éliminé* |

*environ 2 kWh/kg DBO₅ en boues activées

Les résultats obtenus (Tableau 19) témoignent de bons résultats mais les conditions anaérobies du FPh de Totorossa ne permettent pas une nitrification suffisante de l'azote favorable à sa dégradation. De plus, les surfaces mises en jeu demeurent trop importantes au regard des résultats du FPh d'Hachenoua pour une surface plus petite. La station de Totorossa requiert une maintenance plus souple mais nécessite en revanche une gestion des boues du décanteur/digester.

Tableau 19 : Rendements obtenus sur la station FPh Totorossa à Mayotte sur la période 2008-2010 (SIEAM, 2010)

| Rendements | Rendements 1er filtre | Rendements 2ème filtre | Rendements globaux |
|------------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------|
| DCO | 80% | 42% | 88% |
| DBO ₅ | 86% | 32% | 90% |
| MES | 90% | 56% | 95% |
| N Kjeldahl | 41% | 51% | 71% |
| NGL | 41% | 47% | 69% |

4.1.2.3. Maintenance et entretien

La maintenance des filtres est prise en charge par le SIEAM et nécessite l'intervention d'1 homme.jour/mois (soit 8 h/ mois environ) pour Totorossa et d'1,5 homme.jour/mois (soit 12 heures/mois environ) pour Hachenoua répartis sur un calendrier hebdomadaire. Le Tableau 20 résume les tâches nécessaires pour maintenir le bon fonctionnement des filtres.

Tableau 20 : Tâches nécessaires au maintien du fonctionnement des filtres

| |
|--|
| Totorossa, FPh |
| Nettoyage des débris végétaux avant la saison des pluies |
| Entretien des abords du filtre (prolifération intempestive) |
| Visite hebdomadaire pour contrôle (pompes, regards) |
| Vidange de décanteur primaire |
| Hachenoua, FPv |
| Nettoyage des débris végétaux |
| Entretien des abords du filtre (prolifération intempestive) |
| Visite hebdomadaire pour contrôle (pompes, regards) |
| Nettoyage hebdomadaire du panier dégrilleur à l'arrivée dans le poste de relèvement |
| Alternance hebdomadaire des filtres et des bassins d'infiltration |

Les filtres sont toujours en fonctionnement (décembre 2011) et sujets à de nouvelles campagnes d'analyses.

4.1.3. Difficultés rencontrées

Durant les six années d'exploitation des filtres expérimentaux à Mayotte, les difficultés rencontrées sont diverses de la conception à la maintenance.

Au démarrage des deux stations, les charges attendues en entrée n'ont pas été atteintes, des aménagements des filtres (utilisation d'un seul lit compartimenté pour le FPv ; utilisation de deux lits en série pour le FPh) d'adapter les charges réelles à traiter au surface des lits. Cette contrainte était spécifique aux exigences d'expérimentations.

Dès le démarrage de la station de Totorossa en FPh, des compléments ont du être apportés à la demande des services de l'ARS afin de limiter la prolifération de moustiques :

- destruction des plantes *Dieffenbachia* présentant des petits volumes d'eau situé au niveau de l'implantation des feuilles sur la tige ;
- mise en œuvre de matériaux fins (2/6 mm) à la surface du filtre pour empêcher les moustiques de pouvoir accéder à l'eau libre dans les interstices de la pouzzolane ;
- aménagements permettant de supprimer toutes les zones présentant des stagnations d'eau ;
- mise en place de grillage anti-moustique aux endroits où il est impossible de supprimer toute stagnation d'eau susceptible d'être colonisée par les moustiques (aération des postes de refoulement, canal de sortie, ...).



photo D. Esser

Figure 32 : FPv d'Hachenoua, Mayotte

Lors de l'exploitation, des dysfonctionnements ont été constatés sur les deux stations dus principalement à des **pannes électriques** et à des **actes de vandalisme** mais aussi à un **manque de maintenance**. En effet, la problématique maintenance est une composante importante au bon fonctionnement des filtres : l'alternance des lits pour le filtre FPv d'Hachenoua (Figure 32) n'étant pas régulière, un colmatage du lit alimenté en permanence est observé, certaines plantes ont été arrachées, des drains d'aération coupés. Il faut rappeler que l'équipe en charge de la maintenance n'étant pas sur place, a subi des problèmes de transport lors des intempéries et manifestations de 2011.

Les éléments du Tableau 21 sont à retenir.

Tableau 21 : Leçons à retenir des stations expérimentales de Mayotte

| | |
|--|---|
| Minimiser la prolifération de moustiques | Matériaux fins à la surface des lits des FPh Grillage anti-moustique sur les ouvrages avec stagnation d'eau hermétiquement Grillage anti-moustique sur les drains d'aération et évacuation Pas de plantes susceptibles de retenir l'eau en surface |
| Matériaux | Ne pas utiliser d'acier traité ou galvanisé Utiliser inox 316L ou PVC |
| Plantes | FPv : <i>Thysanolaena maxima</i> PFh : <i>Typha augustifolia</i> |
| Laboratoire | S'assurer la qualité des analyses locales |

4.2. Projet en cours de développement, le cas de la Guyane

4.2.1. Filtre planté et Guyane

La Guyane est le seul DOM continental témoignant de spécificités locales de gestion de l'eau. L'assainissement, porté à plus de 40 % en ANC, est fragile. On distingue la zone littorale la plus développée, des territoires isolés du cœur de la Guyane. Ces zones présentent des modes de gestion de l'assainissement différents. D'un point de général, la zone littorale accueille des systèmes d'assainissement « améliorés » avec la présence d'un réseau de collecte dans les secteurs les plus peuplés tandis que la zone interne des territoires isolés ne dispose qu'exceptionnellement de réseau.

Une étude est actuellement en cours, à l'initiative de services publics locaux pour le diagnostic de l'assainissement dans les territoires isolés guyanais incluant les aspects sociologiques, un recensement des procédés actuellement utilisés et tend à identifier les procédés de traitement les plus adaptés à ces contextes ainsi que d'identifier les outils de diagnostic des SPANC.

Parallèlement, dans la zone littorale, deux stations de traitement par filtres plantés à écoulement vertical à un étage recirculé se sont construits à Macouria. Ces ouvrages sont la propriété d'Amazonie Promotion Immobilière et s'inscrivent dans le cadre de la création d'un lotissement privé, Bois d'Opale. Ces deux ouvrages, construits par la société Epure Nature, sont actuellement suivis par le bureau d'étude ETIAGE dans le cadre de l'autosurveillance (Cf. arrêté du 22 juin 2007).

Les caractéristiques techniques de ces filtres sont rappelées dans le Tableau 22 (Etiage, Juin 2011).

Tableau 22 : Caractéristiques techniques de Bois d'Opale 1, Guyane

| | Bois d'Opale 1 | Bois d'Opale 2 | unité |
|-------------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------|
| Mise en service | mars-10 | févr.-11 | - |
| Capacité nominale | 300 | 480 | EH |
| Surface par filtre | 121 | 196 | m ² |
| Dimensionnement nominal | 0,8 | 0,8 | m ² /EH* |
| Nombre d'étage | 1 | 1 | - |
| Nombre de filtre | 2 | 2 | - |
| Espèce végétale | <i>Arundo donax</i> | <i>Phragmites australis</i> | - |

Les premiers résultats de l'auto-surveillance de Bois d'Opale 1, témoignent d'une sous-charge organique de la station avec une charge organique en entrée équivalente à environ 80 EH (5 kg DBO₅/j) et une surcharge hydraulique équivalente à environ 480 EH (pour 150L/EH/j) témoignant d'intrusions d'eaux claires parasites. Les rendements imposés par la législation sont largement atteints mais en terme expérimental, le dimensionnement initial est loin d'être respecté (environ 7 m²/EH sur la base des charges entrantes en DBO₅, pour une charge hydraulique moyenne de 0,7 m/j).

4.2.2. Difficultés rencontrées et à appréhender

Au cours de la construction de Bois d'Opale 1, une arrivée de latérites sur le filtre a induit un léger colmatage du filtre. Cette observation renforce les réflexions antérieures sur la vigilance à tenir lors des phases de construction des filtres.

Le contexte guyanais peut imposer une indépendance énergétique des installations pour les territoires les plus isolés, des difficultés d'approvisionnement en matériaux importés, une faible disponibilité en engins de manutention et des difficultés en approvisionnement de sables et graviers de bonne qualité.

La question du végétal préalablement abordée, est quasi résolue avec la présence de *Phragmites australis* en Guyane. Cependant, pour les zones appartenant au Parc Amazonien de Guyane ainsi que pour les zones protégées (PNR), d'avantages de précautions devront être entreprises.

4.3. Choix expérimentaux

4.3.1. Eléments à mettre en œuvre

Ces deux seules expériences de FPv eaux usées brutes à taille réelle dans les DOM mettent en valeur l'aspect humain insistant sur la rigueur nécessaire à la mise en œuvre de cette technique autant lors de la construction que lors de la maintenance.

Les éléments suivants sont ainsi à retenir (Tableau 23).

Tableau 23 : Eléments à prendre en compte pour les choix expérimentaux

| | |
|-----------------------------|--|
| Contexte DOM | Optimiser l'emprise au sol des filtres Adapter des modèles de conception pour le traitement de l'azote |
| Problématique climatique | Suivi des performances inter saisonnières Suivi des flux hydrauliques en parallèle |
| Problématique de conception | Suivi de l'influence de la minéralogie des matériaux Suivi de l'influence de différentes espèces végétales |
| Problématique d'intégration | Accompagnement pour la construction d'ouvrage Editer des guides d'exploitation des ouvrages Former le personnel d'exploitation |

4.3.2. Propositions techniques

Au vu de cette étude et considérant les visites techniques de terrain conduites en parallèle de ce travail, certains modèles de conception ont été retenus afin d'optimiser ces techniques dans le contexte tropical des DOM. En premier lieu, le FPv eaux usées brutes est retenu sur la base initiale de dimensionnement de la filière classique française à deux étages en considérant les résultats des unités de traitement de Mayotte et de Guyane.

Cependant, pour répondre à l'enjeu de la réduction de l'emprise au sol de ces procédés, majoritaire dans le contexte insulaire, il est proposé de compartimenter les filtres en construction afin de tester différents dimensionnements sans compromettre les performances de l'installation.

Pour le traitement des effluents sans exigence de traitement particulière, un premier modèle peut être développé :

- PFv eaux brutes à un étage avec possibilité de recirculation ;
- Compartimentation des filtres pour tester différents dimensionnements en fonction des charges entrantes ;
- Variation des épaisseurs de filtre sur les filtres parallèles ;
- Variation des espèces végétales entre les filtres parallèles ;
- Suivi des performances sur les paramètres pH, redox, DBO₅, DCO, MES, NH₄, NO₂, NO₃, NGL, PT, *E. coli*, coliformes totaux et entérocoques intestinaux ;
- Suivi des flux hydrauliques en entrée, sortie et flux recirculés.

Pour le traitement des effluents avec exigence de traitement sur les paramètres azotés et/ou pathogènes, un second modèle peut être développé :

- FPv eaux usées brutes à deux étages avec possibilité de saturer le fond d'un filtre au minimum au premier et/ou second étage et possibilité de recirculation ;
- Mise en place d'une unité de traitement des pathogènes en sortie de filtre (UV) ;
- Variation des épaisseurs de filtre sur les filtres parallèles ;
- Variation des espèces végétales entre les filtres parallèles ;
- Suivi des performances sur les paramètres pH, redox, DBO₅, DCO, MES, NH₄, NO₂, NO₃, NGL, PT, *E. coli*, coliformes totaux et entérocoques intestinaux chaque étage ;
- Suivi des flux hydrauliques en entrée, sortie et flux recirculés.

La mise en place d'un horizon en fond de filtre va permettre d'étudier le potentiel de dénitrification des filtres dans cette configuration.

Un appui technique aux collectivités pour la construction de ces opérations et l'établissement du CCTP lors du lancement du marché est également proposé. Parallèlement, des protocoles de suivi seront adaptés par l'équipe Irstea pour satisfaire le suivi expérimental. Une formation du personnel exploitant devra être intégrée dans le marché avec le constructeur.

5. Conclusion

Le contexte de l'assainissement dans les Départements d'Outre Mer révèle une spécificité des contraintes locales associées en partie au climat tropical avec des pluies de fortes intensités accompagnées de températures relativement stables dans l'année mais aussi à l'urbanisation souvent anarchique de ces territoires.

Pour faire face à la forte demande en logements, de nouveaux lotissements sont créés. Ce rapide développement a tendance à devancer la mise en place d'infrastructures publiques d'assainissement et de nouvelles STEU privées sont ainsi construites. La plupart de ces nouvelles installations sont du type « boues activées », plus compact, mais le manque de maintenance et d'entretien résulte trop souvent en des dysfonctionnements réguliers.

La recherche de procédés plus robustes et simples de gestion conduit à la question du transfert des techniques extensives. Le choix est porté vers les techniques de filtres plantés ; la technique de lagunage étant plus largement étudiée dans ces contextes. Les filtres plantés intègrent l'utilisation de matériaux locaux avec une gestion simplifiée des boues mais nécessitent une surface plus importante que les procédés intensifs. La question du foncier dans les DOM est sensible, une optimisation de l'emprise au sol des filtres plantés est nécessaire. L'effet positif du climat tropical sur les performances du filtre tend à favoriser cette adaptation.

Le potentiel des DOM à accueillir les techniques de filtres plantés est ainsi étudié en se basant tout d'abord sur les expérimentations internationales dans le climat tropical puis en s'attachant aux ressources locales disponibles.

Les expériences internationales présentent une hétérogénéité dans la conception des procédés utilisés autant dans le choix des matériaux et espèces végétales que dans les charges appliquées au filtre. Cependant, la comparaison de ces expérimentations permet de dresser un ordre de grandeur des charges appliquées sur les filtres et met en lumière une certaine stabilité des rendements épuratoires malgré les variantes de conception. Cette observation conforte la faculté d'adaptation et la robustesse préalablement annoncée de ce procédé.

L'état des lieux des matériaux locaux disponibles dans les DOM montre que le facteur limitant ne sera pas la quantité de matériaux nécessaire mais la qualité de ces matériaux : une teneur en particule fine inférieure à 3 % est exigée. Par ailleurs, la question du végétal induit pour certains DOM l'intégration de nouveaux végétaux autochtones sur les filtres, végétaux assimilables à *Phragmites australis* généralement utilisé en métropole. Les retours d'expérience avec des filtres du type eaux usées brutes plantés de ces végétaux sont actuellement limités aux opérations de Mayotte et de Guyane.

Les expériences des filtres plantés déjà présents dans les DOM soulignent la nécessité d'une maintenance rigoureuse autant lors de la phase de construction que lors de l'exploitation.

Sont ainsi proposés des modèles de conception dans le but d'optimiser l'emprise au sol mais aussi d'affiner le traitement. Des protocoles de suivi expérimental sont associés à cette étude afin de compléter les expériences étudiées et en vue d'établir des règles de dimensionnement plus précises.

Bibliographie

- Abidi, S., Kallali, H., Jedidi, N., Bouzaiane, O. and Hassen, A., 2009, Comparative pilot study of the performances of two constructed wetland wastewater treatment hybrid systems: Desalination, v. 246, p. 370-377.
- Agudelo, R.M., Peñuela, G., Aguirre, N.J., Morató, J. and Jaramillo, M.L., 2010, Simultaneous removal of chlorpyrifos and dissolved organic carbon using horizontal sub-surface flow pilot wetlands: Ecological Engineering, v. 36, p. 1401-1408.
- Ahmed, S., Popov, V. and Trevedi, R.C., 2008, Constructed wetland as tertiary treatment for municipal wastewater: Proceedings of Institution of Civil Engineers: Waste and Resource Management, v. 161, p. 77-84.
- Ascuntar Ríos, D., Toro Vélez, A.F., Peña, M.R. and Madera Parra, C.A., 2009, Changes of flow patterns in a horizontal subsurface flow constructed wetland treating domestic wastewater in tropical regions: Ecological Engineering, v. 35, p. 274-280.
- Ayaz, S.Ç., 2008, Post-treatment and reuse of tertiary treated wastewater by constructed wetlands: Desalination, v. 226, p. 249-255.
- Bayley, M.L., Davison, L. and Headley, T.R., 2003, Nitrogen removal from domestic effluent using subsurface flow constructed wetlands: Influence of depth, hydraulic residence time and pre-nitrification, Water Science and Technology, Volume 48, p. 175-182.
- Belmont, M.A. and Metcalfe, C.D., 2003, Feasibility of using ornamental plants (*Zantedeschia aethiopica*) in subsurface flow treatment wetlands to remove nitrogen, chemical oxygen demand and nonylphenol ethoxylate surfactants--a laboratory-scale study: Ecological Engineering, v. 21, p. 233-247.
- Billore, S.K., Singh, N., Sharma, J.K., Dass, P. and Nelson, R.M., 1999, Volume 40: Proceedings of the 1998 6th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control: Sao Paulo, Braz, Elsevier Science Ltd, p. 163-171.
- BRGM, 2002, Schéma Départemental des Carrières de Mayotte, p. 65.
- BRGM, 2005, Schéma Départemental des Carrières de Martinique, p. 99.
- BRGM, 2010, Schéma Départemental des Carrières de la Réunion.
- BRGM, 2011, Schéma Départemental des Carrières de la Guyane.
- Brix, H., 1997, Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands?: Water Sci. Technol., v. 35, p. 11-17.
- Butler, J.E., 1990, Gravel hydroponic systems used for secondary and tertiary treatment of sewage effluent: Water and environment journal.
- Caselles-Osorio, A., Villafañe, P., Caballero, V. and Manzano, Y., 2011, Efficiency of Mesocosm-Scale Constructed Wetland Systems for Treatment of Sanitary Wastewater Under Tropical Conditions: Water, Air and Soil Pollution, p. 1-11.
- Chazarenc, F., Brisson, J. and Merlin, G., 2010, Seasonal and spatial changes of microorganism communities in constructed wetlands: A community level physiological profiling analysis: International Journal of Chemical Engineering.
- Chazarenc, F., Merlin, G. and Gonthier, Y., 2003, Hydrodynamics of horizontal subsurface flow constructed wetlands: Ecological Engineering, v. 21, p. 165-173.
- Cota, R.S., Von Sperling, M. and Penido, R.C.S., 2011, Tracer studies and hydraulic behaviour of planted and un-planted vertical-flow constructed wetlands: Water Sci. Technol., v. 64, p. 1056-1063.
- Cui, L., Ouyang, Y., Lou, Q., Yang, F., Chen, Y., Zhu, W. and Luo, S., 2010, Removal of nutrients from wastewater with *Canna indica* L. under different vertical-flow constructed wetland conditions: Ecological Engineering, v. 36, p. 1083-1088.
- Da Motta Marques, D.M.L., Leite, G.R. and Giovannini, S.G.T., 2001, Volume 44, p. 311-316.
- Dallas, S. and Ho, G., 2005, Volume 51, p. 119-128.
- Dan, T.H., Quang, L.N., Chiem, N.H. and Brix, H., 2011, Treatment of high-strength wastewater in tropical constructed wetlands planted with *Sesbania sesban*: Horizontal subsurface flow versus vertical downflow: Ecological Engineering, v. 37, p. 711-720.
- Davison, L., Headley, T. and Edmonds, M., 2001, Volume 44, p. 353-360.
- Davison, L., Headley, T. and Pratt, K., 2005, Volume 51, p. 129-138.
- El Hamouri, B., Nazih, J. and Lahjouj, J., 2007, Subsurface-horizontal flow constructed wetland for sewage treatment under Moroccan climate conditions: Desalination, v. 215, p. 153-158.
- Esser, D., Jusiak, P. and Liénard, A., 2006, The use of constructed wetlands for the treatment of effluents from housing schemes and villages in an island in the tropics: the case of Mayotte, 10th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control, Lisbonne, 23-29 septembre 2006, p. 8.
- Esser, D., Riegel, C., Boura, S. and Lienard, A., 2010, The use of constructed wetlands for the treatment of effluents from housing schemes and villages in an island in the tropics: New results from Mayotte, 12th

- International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control, 04/10/2010 - 08/10/2010: Venise, ITA, p. 10.
- Etiage, Juin 2011, Bilan de pollution 24h au titre de l'autosurveillance des ouvrages d'épuration Arrêté du 22 juin 2007 Bois d'Opale 1 Guyane.
- Ge, Y., Zhang, C., Jiang, Y., Yue, C., Jiang, Q., Min, H., Fan, H., Zeng, Q. and Chang, J., 2011, Soil Microbial Abundances and Enzyme Activities in Different Rhizospheres in an Integrated Vertical Flow Constructed Wetland: *Clean - Soil, Air, Water*, v. 39, p. 206-211.
- Heers, M., 2006, Constructed wetlands under different geographic conditions : Evaluation of the suitability and criteria for the choice of plants including productive species: Hamburg, Hamburg University of Applied Sciences, Germany Faculty of Life Sciences.
- Huang, J., Wang, S.h., Yan, L. and Zhong, Q.s., 2010, Plant photosynthesis and its influence on removal efficiencies in constructed wetlands: *Ecological Engineering*, v. 36, p. 1037-1043.
- Jia, W., Zhang, J., Wu, J., Xie, H. and Zhang, B., 2010, Effect of intermittent operation on contaminant removal and plant growth in vertical flow constructed wetlands: A microcosm experiment: *Desalination*, v. 262, p. 202-208.
- Jinadasa, K.B.S.N., Tanaka, N., Mowjood, M.I.M. and Werellagama, D.R.I.B., 2006, Effectiveness of *Scirpus grossus* in treatment of domestic wastes in a constructed wetland: *Journal of Freshwater Ecology*, v. 21, p. 603-612.
- Juwarkar, A.S., Oke, B., Juwarkar, A. and Patnaik, S.M., 1995, Volume 32: Proceedings of the 1994 4th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control: Guangzhou, China, Pergamon Press Inc, p. 291-294.
- Kadlec, R.H. and Knight, R.L., 1996, *Treatment Wetlands*.
- Kadlec, R.H. and Wallace, S., 2009, *Treatment wetlands*, CRC Press.
- Kantawanichkul, S., Kladprasert, S. and Brix, H., 2009, Treatment of high-strength wastewater in tropical vertical flow constructed wetlands planted with *Typha angustifolia* and *Cyperus involucratus*: *Ecological Engineering*, v. 35, p. 238-247.
- Kantawanichkul, S., Pilaila, S., Tanapiyawanich, W., Tikampornpittaya, W. and Kamkrua, S., 1999, Volume 40: Proceedings of the 1998 6th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control: Sao Paulo, Braz, p. 173-178.
- Kantawanichkul, S. and Somprasert, S., 2005, Using a compact combined constructed wetland system to treat agricultural wastewater with high nitrogen: *Water Sci. Technol.*, v. 51, p. 47-53.
- Kaseva, M.E., 2004, Performance of a sub-surface flow constructed wetland in polishing pre-treated wastewater - A tropical case study: *Water Research*, v. 38, p. 681-687.
- Katsenovich, Y.P., Hummel-Batista, A., Ravinet, A.J. and Miller, J.F., 2009, Performance evaluation of constructed wetlands in a tropical region: *Ecological Engineering*, v. 35, p. 1529-1537.
- Kelvin, K. and Tole, M., 2011, The efficacy of a tropical constructed wetland for treating wastewater during the dry season: The Kenyan experience: *Water, Air, and Soil Pollution*, v. 215, p. 137-143.
- Knowles, P., Dotro, G., Nivala, J. and Garcia, J., 2011, Clogging in subsurface-flow treatment wetlands: Occurrence and contributing factors: *Ecological Engineering*, v. 37, p. 99-112.
- Konnerup, D., Koottatep, T. and Brix, H., 2009, Treatment of domestic wastewater in tropical, subsurface flow constructed wetlands planted with *Canna* and *Heliconia*: *Ecological Engineering*, v. 35, p. 248-257.
- Kurniadie, D., 2011, Wastewater treatment using vertical subsurface flow constructed wetland in Indonesia: *American Journal of Environmental Sciences*, v. 7, p. 15-19.
- Laber, J., Haberl, R. and Shrestha, R., 1999, Volume 40: Proceedings of the 1998 6th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control: Sao Paulo, Braz, p. 317-324.
- Liang, M.Q., Zhang, C.F., Peng, C.L., Lai, Z.L., Chen, D.F. and Chen, Z.H., 2011, Plant growth, community structure, and nutrient removal in monoculture and mixed constructed wetlands: *Ecological Engineering*, v. 37, p. 309-316.
- Liénard, A., 2010, Suivi expérimental des filtres plantées de Hachenoua et de Totorossa Mayotte 2006-2010, SIEM, Cemagref, SINT.
- Lloréns, M., Pérez-Marín, A.B., Aguilar, M.I., Sáez, J., Ortuño, J.F. and Meseguer, V.F., 2011, Nitrogen transformation in two subsurface infiltration systems at pilot scale: *Ecological Engineering*, v. 37, p. 736-743.
- Mbuligwe, S.E., 2004, Comparative effectiveness of engineered wetland systems in the treatment of anaerobically pre-treated domestic wastewater: *Ecological Engineering*, v. 23, p. 269-284.
- Melián, J.A.H., Martín-Rodríguez, A.J., Araña, J., Díaz, O.G. and Henríquez, J.J.G., 2010, Hybrid constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in the Canary Islands: *Ecological Engineering*, v. 36, p. 891-899.
- Molle, P., Liénard, A., Boutin, C., Merlin, G. and Iwema, A., 2005a, How to treat raw sewage with constructed wetlands: an overview of the French systems: *Water Sci. Technol.*, v. 51, p. 11-21.
- Molle, P., Liénard, A., Boutin, C., Merlin, G. and Iwema, A., 2005b, How to treat raw sewage with constructed wetlands: an overview of the French systems: *Water Sci. Technol.*, v. 51, p. 11-21.

- Molle, P., Lienard, A., Grasmick, A. and Iwema, A., 2006, Effect of reeds and feeding operations on hydraulic behaviour of vertical flow constructed wetlands under hydraulic overloads: *Water Research*, v. 40, p. 606-612.
- Mosquera, H.G., Varón, M.R.P. and Reyes, A.A., 2010, Nitrogen balance estimation in a subsurface flow constructed wetland planted with *Heliconia psittacorum* for domestic wastewater treatment: Estimación del balance de Nitrógeno en un humedal construido subsuperficial plantado con *Heliconia psittacorum* para el tratamiento de aguas residuales domésticas, p. 87-98.
- Njau, K.N., Gastory, L., Eshton, B., Katima, J.H.Y., Minja, R.J.A., Kimwaga, R. and Shaaban, M., 2011, Effect of diffusional mass transfer on the performance of horizontal subsurface flow constructed wetlands in tropical climate conditions: *Water Sci. Technol.*, v. 63, p. 3039-3045.
- Nyakang'o, J.B. and Van Bruggen, J.J.A., 1999, Volume 40: Proceedings of the 1998 6th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control: Sao Paulo, Braz, Elsevier Science Ltd, p. 249-256.
- Okurut, T.O., Rijs, G.B.J. and Van Bruggen, J.J.A., 1999, Volume 40: Proceedings of the 1998 6th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control: Sao Paulo, Braz, Elsevier Science Ltd, p. 265-271.
- Philippi, L.S., Da Costa, R.H.R. and Sezerino, P.H., 1999, Volume 40: Proceedings of the 1998 6th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control: Sao Paulo, Braz, Elsevier Science Ltd, p. 125-131.
- Platzer, M., Cáceres, V. and Fong, N., 2004, Volume 50, p. 293-300.
- Polprasert, C. and Sawaitayothin, V., 2006, in Kroiss, H., ed., Volume 54, p. 147-154.
- Radha Madhaw, M., Gangadhar Rao, G. and Ravi, B., 2002, Efficiency of constructed wetland to treat domestic sewage and industrial wastewater: *Asian Journal of Microbiology, Biotechnology and Environmental Sciences*, v. 4, p. 291-294.
- Richez, N., 2011, Comment développer un assainissement durable dans les DOM ? Etat des lieux de l'assainissement des départements d'Outre-Mer et proposition d'actions pour le développer: Paris, Ecole des Ponts, ParisTech.
- Rivera, F., Warren, A., Ramirez, E., Decamp, O., Bonilla, P., Gallegos, E., Calderon, A. and Sanchez, J.T., 1995, Volume 32: Proceedings of the 1994 4th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control: Guangzhou, China, Pergamon Press Inc, p. 211-218.
- Sawaitayothin, V. and Polprasert, C., 2006, Kinetic and mass balance analysis of constructed wetlands treating landfill leachate: *Environmental Technology*, v. 27, p. 1303-1308.
- Shrestha, R.R., Haberl, R., Laber, J., Manandhar, R. and Mader, J., 2001, Volume 44, p. 381-386.
- Soubeyran, Y., 2008, Espèces exotiques envahissantes dans les collectivités françaises d'outre-mer dans les collectivités françaises d'outre-mer, Etat des lieux et recommandations, in UICN, ed.
- Tanner, C.C., Kadlec, R.H., Gibbs, M.M., Sukias, J.P.S. and Nguyen, M.L., 2002, Nitrogen processing gradients in subsurface-flow treatment wetlands - Influence of wastewater characteristics: *Ecological Engineering*, v. 18, p. 499-520.
- Tomenko, V., Ahmed, S. and Popov, V., 2006, Performance prediction of a constructed wetland wastewater treatment plant, Volume 92: 3rd International Conference on Waste Management and the Environment, WASTE MANAGEMENT 2006, WM06: Malta, p. 143-152.
- Tunçsiper, B., 2009, Nitrogen removal in a combined vertical and horizontal subsurface-flow constructed wetland system: *Desalination*, v. 247, p. 466-475.
- Tunçsiper, B., Ayaz, S., Akca, L. and Gunes, K., 2009, Performance of a pilot-scale, three-stage constructed wetland system for domestic wastewater treatment: *Environmental Technology*, v. 30, p. 1187-1194.
- Tzanakakis, V.E., Paranychianaki, N.V. and Angelakis, A.N., 2007, in Angelakis, A.N., and Koutsoyiannis, D., eds., Volume 7, p. 67-75.
- Vymazal, J., 2011, Plants used in constructed wetlands with horizontal subsurface flow: a review: *Hydrobiologia*, p. 1-24.
- Vymazal, J. and Kröpfelová, L., 2008, *Wastewater Treatment in Constructed Wetlands with Horizontal Sub-Surface Flow*, Springer.
- Vymazal, J. and Kröpfelová, L., 2011, A three-stage experimental constructed wetland for treatment of domestic sewage: First 2 years of operation: *Ecological Engineering*, v. 37, p. 90-98.
- WHO, 2012, Progress in drinking water and sanitation, Update 2012, p. 66.
- Williams, J.B., Zambrano, D., Ford, M.G., May, E. and Butler, J.E., 1999, Constructed wetlands for wastewater treatment in Colombia: *Water Sci. Technol.*, v. 40, p. 217-223.
- Yildirim, M. and Topkaya, B., 2012, Assessing environmental impacts of wastewater treatment alternatives for small-scale communities: *Clean - Soil, Air, Water*, v. 40, p. 171-178.
- Zhang, C.-B., Wang, J., Liu, W.-L., Zhu, S.-X., Ge, H.-L., Chang, S.X., Chang, J. and Ge, Y., 2010, Effects of plant diversity on microbial biomass and community metabolic profiles in a full-scale constructed wetland: *Ecological Engineering*, v. 36, p. 62-68.

- Zhang, C.B., Ke, S.S., Wang, J., Ge, Y., Chang, S.X., Zhu, S.X. and Chang, J., 2011a, Responses of microbial activity and community metabolic profiles to plant functional group diversity in a full-scale constructed wetland: *Geoderma*, v. 160, p. 503-508.
- Zhang, C.B., Liu, W.L., Wang, J., Chen, T., Yuan, Q.Q., Huang, C.C., Ge, Y., Chang, S.X. and Chang, J., 2011b, Plant functional group richness-affected microbial community structure and function in a full-scale constructed wetland: *Ecological Engineering*, v. 37, p. 1360-1368.
- Zhang, D.Q., Tan, S.K., Gersberg, R.M., Zhu, J., Sadreddini, S. and Li, Y., 2012, Nutrient removal in tropical subsurface flow constructed wetlands under batch and continuous flow conditions: *Journal of Environmental Management*, v. 96, p. 1-6.
- Zhu, S.-X., Ge, H.-L., Ge, Y., Cao, H.-Q., Liu, D., Chang, J., Zhang, C.-B., Gu, B.-J. and Chang, S.-X., 2010, Effects of plant diversity on biomass production and substrate nitrogen in a subsurface vertical flow constructed wetland: *Ecological Engineering*, v. 36, p. 1307-1313.
- Zurita, F., Belmont, M.A., De Anda, J. and White, J.R., 2011, Seeking a way to promote the use of constructed wetlands for domestic wastewater treatment in developing countries: *Water Sci. Technol.*, v. 63, p. 654-659.
- Zurita, F., de Anda, J. and Belmont, M.A., 2006, Performance of laboratory-scale wetlands planted with tropical ornamental plants to treat domestic wastewater: *Water Quality Research Journal of Canada*, v. 41, p. 410-417.
- Zurita, F., De Anda, J. and Belmont, M.A., 2009, Treatment of domestic wastewater and production of commercial flowers in vertical and horizontal subsurface-flow constructed wetlands: *Ecological Engineering*, v. 35, p. 861-869.

Table des illustrations

| | |
|---|----|
| Figure 1 : DOM français dans le monde..... | 13 |
| Figure 2 : Cas de STEU à l'abandon (Le Lamentin, Guadeloupe)..... | 15 |
| Figure 3 : Systèmes extensifs vs. Intensifs | 16 |
| Figure 4 : Exemple de filtre planté, Roussillon (84) 1 350 EH | 17 |
| Figure 5 : FPh - Filtre planté à écoulement horizontal, schéma de principe | 19 |
| Figure 6 : FPv - Filtre planté à écoulement vertical, schéma de principe | 20 |
| Figure 7 : FPv eaux usées domestiques brutes, schéma de principe de la filière développée par Irstea | 21 |
| Figure 8 : Problématique de l'adaptation des filtres plantés au contexte tropical | 24 |
| Figure 9 : Carte mondiale représentant le pourcentage de population disposant d'un assainissement performant en 2010 | 25 |
| Figure 10 : Répartition des pays sous climat tropical (classification de Köppen; Af : climat équatorial; Am climat de mousson; Aw climat de savane avec hiver sec)..... | 27 |
| Figure 11 : Echelle des expérimentations et état de l'art | 29 |
| Figure 12 : Matériaux recommandés pour la filière à deux étages de traitement des eaux usées brutes par FPv (adaptée de Molle et al., 2005b)..... | 31 |
| Figure 13 : Fuseaux granulométriques pour le choix des sables et graviers en assainissement..... | 31 |
| Figure 14 : Surface d'un FPv eaux usées brutes en début de croissance des végétaux | 35 |
| Figure 15 : Filtre planté hybride de Ko Phi Phi en Thaïlande, aspect esthétique (2008)..... | 38 |
| Figure 16 : Bâchées sur un FPv | 38 |
| Figure 17 : Représentation par boîte à moustaches | 40 |
| Figure 18 : Charges appliquées sur le filtre en fonctionnement pour les FPv | 41 |
| Figure 19 : Charges appliquées vs charges éliminées pour la DCO des FPv | 42 |
| Figure 20 : Charges appliquées vs charges éliminées pour les MES des FPv | 42 |
| Figure 21 : Charges appliquées vs charges éliminées pour l'ammonium des FPv | 43 |
| Figure 22 : Charges appliquées vs concentrations en sortie pour les FPv | 43 |
| Figure 23 : Charges appliquées sur les FPh | 44 |
| Figure 24 : Charges appliquées vs charges éliminées pour la DCO des FPh | 45 |
| Figure 25 : Charges appliquées vs charges éliminées pour les MES des FPh | 45 |
| Figure 26 : Charges appliquées vs charges éliminées pour l'ammonium des FPh | 46 |
| Figure 27 : Distribution des temps de séjour pour les FPh | 47 |
| Figure 28 : Charges hydrauliques appliquées aux FPv et FPh..... | 48 |
| Figure 29 : Rendements épuratoires des FPv et FPh | 49 |
| Figure 30 : Concentration en entrée et sortie des FPv et FPh en mg/L..... | 49 |
| Figure 31 : Concentration en entrée et sortie de FPv et FPh en mg/L | 50 |
| Figure 32 : FPv d'Hachenoua, Mayotte | 56 |

Table des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau 1 : Population, superficie et densité de population dans les DOM (INSEE janvier 2011)..... | 13 |
| Tableau 2 : Exemples de critères de dimensionnement pour les FPh (adapté de Vymazal and Kröpfelová, 2008) | 20 |
| Tableau 3 : Comparaison des surfaces nécessaires (m ² /EH) pour le dimensionnement de FPv à partir de formules empiriques de la littérature | 22 |
| Tableau 4 : Classification de Köppen, climat des DOM | 27 |
| Tableau 5 : Publications étudiées | 29 |
| Tableau 6 : Caractéristiques des expériences eaux usées brutes | 30 |
| Tableau 7 : Prescriptions techniques pour le choix des sables du filtre (Liénard et al., 2000 et 2001) | 32 |
| Tableau 8 : Matériaux utilisés dans les FPv (bibliographie citée) | 33 |
| Tableau 9 : Carrières et matériaux disponibles dans les DOM..... | 34 |
| Tableau 10 : Espèces végétales des FPh..... | 36 |
| Tableau 11 : Espèces végétales des FPv..... | 37 |
| Tableau 12 : Statut de <i>Phragmites australis</i> et <i>Arundo donax</i> dans les DOM (sources citées) | 39 |
| Tableau 13 : Charges appliquées sur les FPv (données bibliographiques)..... | 40 |
| Tableau 14 : Charges appliquées sur les FPh (données bibliographiques) | 44 |
| Tableau 15 : Suivi des pathogènes | 51 |
| Tableau 16 : Caractéristiques techniques des stations expérimentales à filtres plantés à Mayotte..... | 54 |
| Tableau 17 : Bilan des campagnes d'analyse 2008-2010 de la station FP d'Hachenoua à Mayotte (SIEAM, 2010) | 55 |
| Tableau 18 : Bilan des campagnes d'analyse 2008-2010 de la station FPh de Totorossa à Mayotte (SIEAM, 2010) | 55 |
| Tableau 19 : Rendements obtenus sur la station FPh Totorossa à Mayotte sur la période 2008-2010 (SIEAM, 2010) | 55 |
| Tableau 20 : Tâches nécessaires au maintien du fonctionnement des filtres | 56 |
| Tableau 21 : Leçons à retenir des stations expérimentales de Mayotte | 57 |
| Tableau 22 : Caractéristiques techniques de Bois d'Opale 1, Guyane..... | 57 |
| Tableau 23 : Eléments à prendre en compte pour les choix expérimentaux | 58 |

Annexes

• ANNEXE 1 : PETIT COLLECTIF ET REGLEMENTATION

Assainissement collectif et Assainissement Non Collectif

La directive européenne Eaux Résiduaires Urbaines 91_271_CEE cadre la majorité des exigences techniques relatives aux installations de traitement des eaux usées domestiques. Sa transcription en droit français distingue les installations publiques des installations privées.

Dans le cas de propriété publique du dispositif de traitement et de son réseau de collecte, on parle d'Assainissement Collectif dont les dispositions techniques sont portées par l'arrêté du 22 juin 2007, en cours de révision.

Dans le cas de propriété privée de l'installation d'assainissement (dont réseau de collecte associé ou non), on parle d'Assainissement Non Collectif (ANC). Les prescriptions techniques appliquées à ces dispositifs sont fonction de la taille des installations. L'arrêté du 22 juin 2007 fixe les dispositions techniques des installation traitant une charge brute de pollution supérieure à 1,2 kg DBO₅/jour tandis que l'arrêté du 7 septembre 2009 fixe les prescriptions techniques applicables aux installations traitant une charge brute de pollution organique inférieure ou égale à 1,2 kg DBO₅/jour.

Seuils de rejet

En clair, pour l'ensemble des ouvrages d'assainissement des eaux usées domestiques de 20 à 2 000 EH, l'arrêté du 22 juin 2007 fixe les seuils de rejet attendus sauf prescriptions particulières des services locaux en charge de l'instruction du dossier au travers du dossier de loi sur l'eau.

| Arrêté du 22/06/07 | | Concentration à ne pas dépasser | | Rendement min. à atteindre | Zone sensible à l'eutrohisation | | | Paramètres généraux |
|--------------------|------|---------------------------------|----|----------------------------|---------------------------------|----|-------------|---|
| < 2000 EH (1,2) | DBO5 | 35 mg/l | ou | 60 % | | | | pH entre 6 et 8,5 Température < 25°C Pas de susbtances de nature à favoriser des odeurs |
| | DCO | | | 60 % | | | | |
| | MES | | | 50 % | | | | |
| > 2000 EH | DBO5 | 25 mg/l | ou | 70-80 % | NGL 10-15 mg/l | ou | 70 % | |
| | DCO | 125 mg/l | | | 75 % | | PT 1-2 mg/l | 80 % |
| | MES | 35 ⁽³⁾ mg/l | | | 90 % | | | |

(1) Pour les installations de lagunage, les mesures sont effectuées exclusivement sur la DCO mesurée sur échantillons non filtré

(2) Les dispositifs d'assainissement mettant en oeuvre une épuration par infiltration ne sont pas visés

(3) Pour le cas du lagunage, MES 150 mg/L

Suivi et auto-surveillance

Le suivi de ces installations est organisé selon les critères de l'arrêté du 22 juin 2007 pour les ouvrages relevant de l'assainissement collectif et selon les prescriptions des services instructeurs au travers du dossier de déclaration/autorisation au titre de la loi sur l'eau pour les installations d'ANC supérieures à 200 EH. Pour les installations inférieures à 200 EH en ANC, seul le contrôle périodique du SPANC fait office de suivi.

D'autres textes réglementaires issus du Code des Collectivités territoriales et du Code de la Santé Publique régissent le cadre juridique des installations d'assainissement et notamment la responsabilité du propriétaire des installations en cas de dysfonctionnement. Le portail sur l'assainissement communal propose en ligne un recueil des textes sur l'assainissement communal à l'adresse suivante <http://assainissement.developpement-durable.gouv.fr/recueil.php>.

• ANNEXE 2 : MATERIAUX DANS LES DOM

Guyane

L'exploitation de carrières se concentre en Guyane sur les gisements de roches dures, sables et latérites. Au 1^{er} juin 2010, on dénombre 29 carrières autorisées en activité sur l'ensemble du département.

Le bassin de Cayenne concentre l'essentiel de la production en matériau du département : 74 % des roches, 33 % des sables et graviers (deuxième position derrière le bassin de St Laurent) et 43 % de la latérite.

A l'heure actuelle, aucune carrière n'est autorisée dans les communes de l'intérieur. Il existe toutefois une petite activité d'extraction de sables et graviers dans le lit mineur du Lawa-Maroni et de l'Oyapock et de latérite et sables blancs à terre.

D'après le Schéma Départemental de la Guyane révisé en avril (BRGM, 2011), « la Guyane présente une situation critique concernant la disponibilité en matériaux de construction. En effet, face aux fermetures prévisibles de carrières (de sable, de roche ou de latérite), et au non renouvellement de celles-ci, les matières premières, nécessaires pour les futurs aménagements, risquent de manquer. Des pénuries en latérite et en sables nobles exploitables à un coût acceptable sont déjà identifiées à court terme. Bien qu'il existe en Guyane de nombreux gisements de ces produits, de qualité et d'importance variables, beaucoup d'entre eux sont situés dans des zones sensibles sur le plan environnemental (SMVM, zones RAMSAR) ou réglementées (restriction dans les documents d'urbanisme) ».

| COMMUNES | MATERIAU | EXPLOITANTS | SURF (ha) | CAPACITE (t/an) | DATE D'AUTORISATION | ECHEANCE |
|------------|----------|--------------------|-----------|-----------------|---------------------|----------|
| CAYENNE | Roche | SCC | 25,70 | 250 000 | 19.10.00 | 2030 |
| | Latérite | | | 10 000 | 03.12.09 | 2010 |
| MACOURIA | Roche | Routière guyanaise | 37,49 | 250 000 | 02.08.07 | 2027 |
| | Latérite | | 3,60 | 48 000 | 24.10.01 | 2011 |
| MONTSINERY | Sable | Carrière du Galion | 30 | 36 000 | 26.09.97 | 2012 |
| | Latérite | | 30 | 40 000 | 26.09.97 | 2012 |
| | Latérite | Routière guyanaise | 2,30 | 13 500 | 27.01.03 | 2013 |
| | Latérite | | 8,76 | 26 000 | 20.10.09 | 2019 |
| ROURA | Roche | SCC | 45,34 | 380 000 | 28.08.08 | 2038 |
| | Sable | | | 11 340 | | |
| | Latérite | | | 14 460 | | |
| | Latérite | FFTP | 39 | 144 000 | 30.11.05 | 2020 |
| | Sable | | 33,10 | 117 000 | 23.01.08 | 2023 |
| IRACOUBO | Sable | Routière guyanaise | 16,47 | 18 750 | 29.04.04 | 2014 |
| | Sable | ETPI Sophie | 20 | 30 000 | 29.10.98 | 2011 |
| | Sable | SARL Somambu | 4,60 | 30 000 | 24.10.00 | 2010 |
| | Latérite | SARL Sophie | 4,80 | 195 000 | 29.01.03 | 2013 |
| KOUROU | Roche | SCC | 10,86 | 60 000 | 19.10.00 | 2030 |
| | Roche | SGDG | 7,72 | 150 000 | 04.05.04 | 2014 |
| | Latérite | SCC | 3 | 37 500 | 10.12.96 | 2011 |
| | Latérite | Routière guyanaise | 4,16 | 39 000 | 29.04.04 | 2014 |
| SINNAMARY | Roche | Routière guyanaise | 5 | 10 000 | 27.03.97 | 2012 |
| | Sable | SARL HORTH | 20 | 60 000 | 02.11.98 | 2013 |
| | Sable | SOCOTRAP | 2,67 | 5 100 | 18.10.00 | 2020 |
| MANA | Roche | SCC | 25 | 50 000 | 30.04.03 | 2033 |
| ST LAURENT | Sable | MTI | 30 | 90 000 | 16.01.03 | 2024 |
| | Sable | SGM | 225 | 64 000 | 10.02.03 | 2023 |
| | Sable | | 26 | 75 000 | 30.03.05 | 2026 |
| | Latérite | MTI | 13 | 40 000 | 2003 | 2024 |
| | Latérite | | 10 | 6 000 | 26.09.97 | 2012 |
| | Latérite | SARL Villeronce | 12 | 75 000 | 02.04.97 | 2012 |
| OUANARY | Roche | SCC | 11,40 | 50 000 | 28.04.04 | 2034 |

liste des carrières en activité en juin 2010 (DRIRE, 2010)

Guadeloupe

Les prélèvements effectués en Guadeloupe concernent principalement des roches et sables d'origine volcanique, du tuf calcaire, et, dans une faible proportion, du sable marin. On compte actuellement 18 carrières en activité en Guadeloupe (dont une à Saint-Martin).

| Exploitant | Adresse carrière (lieu-dit) | Siège social | Nature matériel exploité | N° - date arrêté préfectoral | Terme de l'AP | Capacité totale de production (m³) | Capacité ann. de production (t) | Surface autorisée (ha) |
|------------------------|-----------------------------|--------------|--------------------------|------------------------------|---------------|------------------------------------|---------------------------------|------------------------|
| COLAS GPE | Lac du Petit LES AYMES | BAIE MAHAULT | inférieure | 2004-1308 | 23/08/2009 | 140 000 | 56 350 | 1,4 |
| BESTF | CAPESTERRE DE MAJIE GALANTE | LES AYMES | inférieure | 2007-787 | 01/06/2012 | 116 100 | 33 000 | 4,25 |
| ETPL (Dép. Adept) | Habitation Dédé PETIT CANAL | BAIE MAHAULT | inférieure | 2006-043 | 01/06/2010 | 328 000 | 42 000 | 9,7 |
| ETPL Jumea | Habitation Dédé PETIT CANAL | BAIE MAHAULT | inférieure | 2009-015 | 15/06/2020 | 100 000 | 16 800 | 3,54 |
| GADDARKHAN | Les de Lormas LE GOSIER | BAIE MAHAULT | inférieure | 2004-1308 | 23/08/2019 | 574000 | 33 500 | 4,09 |
| GADDARKHAN | PAPIN AYMES | BAIE MAHAULT | inférieure | 2008-711 | 25/06/2015 | 830000 | 70 000 | 1,22 |
| GADDARKHAN | "Mamane" SENE-ANNE | BAIE MAHAULT | inférieure | 2003-1203 | 09/09/2018 | 1 256 000 | 134 000 | 9,5 |
| SARL MARIE-GALANTE DDI | Départ. Grand Bourg | GRAND BOURG | inférieure | 2008-717 | 20/06/2020 | 40 000 | 5 900 | 3 |
| NAGAPEN Pouch | Changoué STE ANNE | STE ANNE | inférieure | 2001-028 | 27/03/2016 | 400 000 | 38 200 | 2,7 |
| SOGETRA | Site de BODER AYMES | LES AYMES | inférieure | 2007-798 | 01/06/2012 | 207 400 | 62 500 | 2,21 |
| DOREOTA SARL | Lac du "Dupas" STE ANNE | ST FRANÇOIS | inférieure | 2005-1282 | 04/11/2021 | 200 000 | 64 400 | 1,25 |
| ITGC | Chassez AYMES | LES AYMES | inférieure | 2003-019 | 12/06/2013 | 110 000 | 13 450 | 1,68 |
| ITGC | PAPIN AYMES | LES AYMES | inférieure | 2001-108 | 22/02/2011 | 380 000 | 104 400 | 4,98 |
| ITGC | Pont de PETIT CANAL | LES AYMES | inférieure | 87-548 | 24/03/2007 | 950 000 | 153 900 | 2 |
| TCAB | Lac de MOINE A L'EAU | STE ANNE | inférieure | 2004-1306 | 23/08/2015 | 384 000 | 33 840 | 3,39 |
| INDG | Goussier Dédée | DESHAIS | Andine | 86-551 | 15/04/2011 | 10 000 000 | 800 000 | 43 |
| SOGC | Rue du Bois-Saint | ST MARTIN | dune | 2001-040 | 30/06/2011 | 1 700 000 | 220 000 | 1 |
| SARLIERRE DE GUADLOUPE | Rue de Saint-Germain | GOUBEYRE | pouzzolane | 83-691 | 25/06/2011 | 4 000 000 | 400 000 | 29 |
| BOYAGRADE SARL | Arrest Dédée | LA DESHADE | inférieure | 2000-078 | 01/08/2012 | 13 750 | 5 900 | 4 |

liste des carrières en activité au 1er janvier 2008 en Guadeloupe (DRIRE, 2008)

Martinique

Le marché des matériaux en Martinique repose essentiellement sur la production de granulats (remblai des routes, bétons, ...), la fabrication de terre cuite (tuiles et briques) et la fabrication de ciment (BRGM, 2005).

Les besoins en matériaux du marché martiniquais sont principalement satisfaits par :

- la production des granulats élaborés à partir de formations pyroclastiques meubles ou de coulées de roches volcaniques massives concassées dont une partie est exportée vers les îles voisines,
- la fabrication de produits de terre cuite (tuiles et briques) à partir de carrières d'argile situées sur le territoire de la commune des Trois îlets,
- la production de ciment obtenu par broyage de clinker importé et de pouzzolane de Saint-Pierre.

| Exploitant | lieu-dit | Commune | Nature | Surface autorisée (ha) | Capacité autorisée (t/an) | Date de l'arrêté | Date de Fin |
|--------------------------------|-----------------------|---------------|-----------------------|------------------------|---------------------------|------------------|-------------|
| Blanchard SA | Croix Rivail | Ducos | Coulée de Lave | 9,4 | 240 000 | 24/02/06 | 24/02/16 |
| Centrale des Carrières | Long Pré | Lamentin | Coulée de Lave | 8,9 | 162 000 | 02/08/01 | 02/08/13 |
| SECPA | Morne Jalouse | Vauclin | Coulée de Lave | 6,4 | 150 000 | 03/02/83 | 03/02/13 |
| Gravillonord | La Digue | Robert | Coulée de Lave | 12,7 | 30 000 | 26/03/84 | 26/03/14 |
| Carrières Pierre Gouyer | Habitation Beauséjour | Saint Pierre | Dépôts Pyroclastiques | 10 | 420 000 | 14/06/02 | 14/06/17 |
| SNEC MAC | La Reprise | Rivière Salée | Coulée de Lave | 6 | 60 000 | 15/10/96 | 15/10/11 |
| Sablins | Coulée BLANCHE Sud | Saint Pierre | Dépôts Pyroclastiques | 30 | 250 000 | 05/08/94 | 05/08/14 |
| Laguerre | La Melisse | Diamant | Dépôts pyroclastiques | 8 | 145 000 | 02/08/01 | 02/08/12 |
| Poterie des Trois îlets | Sarcelle | Trois-îlets | Argile | 42 | 30 000 | 15/02/99 | 18/02/10 |
| Poterie des Trois îlets | La Pointe | Trois-îlets | Argile | 15 | 30 000 | 26/12/83 | 26/12/12 |
| SFC (Sabl. De Fond Canonville) | Fond Canonville | Saint Pierre | Dépôts Pyroclastiques | 10 | 450 000 | 07/07/04 | 07/07/19 |
| Gravillonord | Petit Galion | Robert | Coulée de Lave | 6,6 | 500 000 | 28/10/04 | 28/10/12 |
| Centrale des Carrières | Fleury-Medecin | Rivière Salée | Coulée de Lave | 12 | 200 000 | 21/06/04 | 13/02/07 |
| Agrégats du Nord | Moulin à vent | Saint Esprit | Coulée de Lave | 4 | 170 000 | 03/06/02 | 03/06/17 |
| Centrale des Carrières | Fénélon | Ducos | Coulée de Lave | 3 | 60 000 | 22/03/84 | 22/03/14 |
| MGG Granulat | Fond Manoël | Diamant | Coulée de Lave | 7 | 90 000 | 22/04/04 | 22/04/10 |
| S. C. A. C. (SCIC) | Caritan | Sainte Anne | Calcaire | 4,5 | | 08/01/91 | 08/01/01 |
| SFC (Sabl. De Fond Canonville) | Fond Canonville | Saint Pierre | Dépôts Pyroclastiques | 10 | 500 000 | 10/07/97 | 01/11/11 |

Arrêt définitif en cours

liste des carrières actives et en cours d'arrêt en 2006 (DRIRE, 2006)

La Réunion

A La Réunion, le marché des matériaux repose principalement sur la production de granulats élaborés à partir d'alluvions. En dehors des granulats, il existe des marchés, moins organisés, de matériaux «bruts d'extraction» utilisés dans les travaux publics ou par les particuliers (enrochements et « tout-venant »).

Le marché des scories a subi une mutation significative. Auparavant utilisées comme tout-venant, les scories sont aujourd'hui traitées (criblées) pour des utilisations plus nobles, dans l'aménagement paysager par exemple.

L'exploitation des tufs pouzzolaniques, utilisés pour l'élaboration de ciment depuis 30 ans, représente une activité pérenne du marché réunionnais avec une production de l'ordre de 80 kt par an (BRGM, 2010).

Mayotte

Les matériaux disponibles à Mayotte sont essentiellement des roches concassées d'origine basaltiques, trachytiques et phonolitiques. D'autres matériaux associés à l'histoire géologique de Mayotte sont disponibles tels que des cendres et pouzzolanes.

« Les 4/5 des formations géologiques constituant l'île de Mayotte correspondent à des coulées de lave appartenant à une série alcaline fortement sous-saturée ayant subi des phénomènes d'altération plus ou moins importants (le 1/5 restant correspondant à des formations pyroclastiques) » (BRGM, 2002)

Dans la perspective de filières de valorisation, trois grands types de ressources naturelles peuvent être définis, résultant de l'évolution magmatique et volcanologique de l'île :

- des laves volcaniques massives, de nature essentiellement basaltique ou phonolitique pour la production de granulats ;
- des formations d'altération provenant de l'argilisation des laves ou produites par une activité hydrothermale (furnerollienne) pour la fabrication de briques ;
- des formations pyroclastiques constituées essentiellement de scories et de tufs cendroponceux (à fort potentiel pouzzolanique).
- On notera l'absence de gisements alluvionnaires que ce soit dans le lit des cours d'eau ou en bordure de littoral.

- **ANNEXE 3 : DONNEES BIBLIOGRAPHIQUES**

FPv

| Pays | Echelle | Type d'effluents | Référence |
|------------------------------|------------|---------------------------------|---|
| Systèmes non colmatés | | | |
| Mexique | Microcosme | domestique (STEU) | <i>Zurita et al., 2009</i> <i>Zurita et al., 2011</i> |
| Canaries | Microcosme | domestique (campus) | <i>Melián et al., 2010</i> |
| Chine | Microcosme | domestique (campus) | <i>Cui et al., 2010</i> |
| Chine | Microcosme | bassin ornemental avec poissons | <i>Ge et al., 2011</i> |
| Chine | Microcosme | synthétique | <i>Jia et al., 2010</i> |
| Thaïlande | Microcosme | synthétique | <i>Kantawanichkul et al., 2009</i> |
| Mexique | Mésocosme | domestique (STEU) | <i>Zurita et al., 2009</i> <i>Zurita et al., 2011</i> |
| Chine | Mésocosme | domestique (STEU) | <i>Du et al., 2009</i> |
| Thaïlande | Mésocosme | agricole dilué | <i>Kantawanichkul et al., 1999</i> |
| Mayotte | Macrocosme | domestique (lotissement) | <i>Liénard et al., 2010</i> |
| Népal | Macrocosme | hôpital | <i>Laber et al., 1999</i> |
| Népal | Macrocosme | eaux grises | <i>Shrestha et al., 2001</i> |
| Chine | Macrocosme | domestique (STEU) | <i>Zhu et al., 2010</i> |
| Chine | Macrocosme | domestique (campus) | <i>Liang et al., 2011</i> |
| Indonésie | Macrocosme | agricole | <i>Kurniadie, 2011</i> |
| Indonésie | Macrocosme | domestique (foyer) | <i>Kurniadie et al., 2009</i> |
| Brésil | Macrocosme | domestique | <i>Cota et al., 2011</i> |
| Chine | Macrocosme | domestique | <i>Zhang et al., 2010</i> |
| Systèmes colmatés | | | |
| Brésil | Mésocosme | agricole | <i>Sezerino et al., 2003</i> |
| Colombie | Macrocosme | domestique (intrusion marine) | <i>Giraldo et al., 2001</i> |
| Côte d'Ivoire | Mésocosme | domestique | <i>Ouattara et al., 2008,</i> <i>Ouattara et al., 2011</i> |

| Pays | Echelle | Type d'effluents | Pré-traitement | Référence |
|--------------|-----------------|--|-------------------------------------|--|
| Colombie | Microcosme | - | - | Mosquera <i>et al.</i> , 2010 |
| Mexique | Microcosme | domestique | fosse septique | Rivera <i>et al.</i> , 1995 |
| Colombie | Microcosme | domestique (campus) | fosse septique | Caselles-Osorio <i>et al.</i> , 2011 |
| Costa Rica | Microcosme | eaux grises | - | Dallas <i>et al.</i> , 2005 |
| Colombie | Microcosme | synthétique | - | Agudelo <i>et al.</i> , 2010 |
| Inde | Microcosme | synthétique industriel | - | Radha Madhaw <i>et al.</i> , 2002 |
| Mexique | Micro/Mésocosme | domestique (STEU) | décanteur | Zurita <i>et al.</i> , 2011 |
| Viet Nam | Mésocosme | agricole dilué | lagune | Dan <i>et al.</i> , 2011 |
| Brésil | Mésocosme | domestique | traitement anaérobie | Da Motta Marques <i>et al.</i> , 2001 |
| Mexique | Mésocosme | domestique | dégrilleur | Zurita <i>et al.</i> , 2009 |
| Tanzanie | Mésocosme | domestique | UASB | Mbuligwe, 2004 |
| Chine | Mésocosme | domestique | STEU | Huang <i>et al.</i> , 2010 |
| Tanzanie | Mésocosme | domestique (campus) | UASB | Kaseva, 2004 |
| Canaries | Mésocosme | domestique (campus) | FPv | Melián <i>et al.</i> , 2010 |
| Thaïlande | Mésocosme | domestique (campus) | décanteur | Konnerup <i>et al.</i> , 2009 |
| Malaysie | Mésocosme | domestique (campus) | décanteur | Lim <i>et al.</i> , 2001 |
| Thaïlande | Mésocosme | domestique (campus) lixivié de décharge dilué | - | Sawaitayothin <i>et al.</i> , 2006, 2007 |
| Mexique | Mésocosme | domestique (STEU) | décanteur | Zurita <i>et al.</i> , 2006 |
| Indonésie | Mésocosme | laboratoire | décanteur | Meutia, 2001 |
| Canada | Mésocosme | synthétique | - | Belmont <i>et al.</i> , 2003 |
| Singapour | Mésocosme | synthétique | - | Zhang <i>et al.</i> , 2012 |
| Singapour | Mésocosme | synthétique | - | Zhang <i>et al.</i> , 2011 |
| Inde | Macrocosme | bâtiments communs | filtre à sable - fossé | Billore <i>et al.</i> , 1999 |
| Brésil | Macrocosme | domestique | UASB | Dornelas <i>et al.</i> , 2009 |
| Nicaragua | Macrocosme | domestique | fosse septique | Platzer <i>et al.</i> , 2004 |
| Cuba | Macrocosme | domestique | prétraitement | Garcia-Armisen <i>et al.</i> , 2008 |
| Mexique | Macrocosme | domestique | fosse septique | Whitney <i>et al.</i> , 2003 |
| Uganda | Macrocosme | domestique | lagune | Okurut <i>et al.</i> , 1999 |
| Tanzanie | Macrocosme | domestique | lagune de maturation | Mashauri <i>et al.</i> , 2000 |
| Mayotte | Macrocosme | domestique | décanteur digesteur | Esser <i>et al.</i> , 2010 |
| Australie | Macrocosme | domestique | décanteur digesteur | Headley <i>et al.</i> , 2005 |
| Australie | Macrocosme | domestique | divers | Davison <i>et al.</i> , 2005 |
| Australie | Macrocosme | domestique | STEU / FPv - filtre à sable | Bayley <i>et al.</i> , 2003 |
| Inde | Macrocosme | domestique | nd | Juwarkar <i>et al.</i> , 1995 |
| Inde | Macrocosme | domestique | boues activées | Ahmed <i>et al.</i> , 2008 |
| Inde | Macrocosme | domestique | boues activées | Tomenko <i>et al.</i> , 2006 |
| Inde | Macrocosme | domestique | boues activées | Sundaravadeivel <i>et al.</i> , 2001 |
| San Salvador | Macrocosme | domestique (base militaire) | lagune | Katsenovich <i>et al.</i> , 2009 |
| Vietnam | Macrocosme | domestique (campus et eaux grises) | filtre à charbon puis filtre à coco | Trang <i>et al.</i> , 2010 |
| Colombie | Macrocosme | domestique (campus) | terrasses en filtre vertical | Williams <i>et al.</i> , 1999 |
| Tanzanie | Macrocosme | domestique (campus) | lagune/fosse septique | Njau <i>et al.</i> , 2011 |
| Kenya | Macrocosme | domestique (campus) | lagune | Mburu, 2008 |
| Sri Lanka | Macrocosme | domestique (campus) | nd | Jinadasa <i>et al.</i> , 2006 |
| Australie | Macrocosme | domestique (école) / eaux grises | fosse septique / filtre à sable | Davison <i>et al.</i> , 2001 |
| Turquie | Macrocosme | domestique (STEU) | STEU | Ayaz, 2008 |
| Colombie | Macrocosme | domestique (STEU) | lagune anaérobie | Ascuntar Rios <i>et al.</i> , 2009 |
| Népal | Macrocosme | hospitalier | décanteur digesteur | Laber <i>et al.</i> , 1999 |
| Brésil | Macrocosme | industriel (zone artisanale) | fosse septique | Philippi <i>et al.</i> , 1999 |
| Chine | Macrocosme | pisciculture | lagune | Zhang <i>et al.</i> , 2011 |
| Kenya | Macrocosme | restaurant et centre nautique | fosse septique | Nyakang'o <i>et al.</i> , 1999 |
| Kenya | Macrocosme | restaurant et centre nautique | fosse septique | Kelvin <i>et al.</i> , 2011 |

- ANNEXE 4 : DONNEES DES SRTATIONS FPV D'HACHENOUA ET FPH DE TOTOROSSA A MAYOTTE**

| | Hachenoua | Toto Rossa filtre B1 | Toto Rossa filtre B2 | Toto Rossa filtre B1&B2 |
|--|---------------|---|--|---|
| | Effluent brut | Effluent primaire (sortie décanteur-digester) | Effluent secondaire (sortie filtre B1) | Effluent primaire (sortie décanteur-digester) |
| Nombre d'habitants | 104 | 75 | 75 | 75 |
| Rejet eaux usées | 8,6 m3/j | 5,8 m3/j | 5,8 m3/j | 5,8 m3/j |
| Surface totale | 81,0 m² | 150,0 m² | 150,0 m² | 300,0 m² |
| Charge hydraulique mm/j * | 106 | 39 | 39 | 19 |
| Charge hydraulique mm/j ** (avec recirculation) | 501 | - | - | - |
| m²/ EH (150 L/EH) | 1,4 m² | 3,9 m² | 3,9 m² | 7,7 m² |
| m²/ EH (60 g DCO/EH)*** | 1,5 m² | 4,0 m² | - | 8,1 m² |
| Charge appliquée gDCO/m²/jour **** | 81 g | 14,9 g | 3,0 g | 7,4 g |
| Charge éliminée gDCO/m²/j | 73 g | 11,9 g | 1,2 g | 6,6 g |
| Rendement DCO | 90% | 80% | 42% | 88% |
| Charge appliquée gDBO₅/m²/jour | 46 g | 6,3 g | 0,9 g | 3,1 g |
| Charge éliminée gDBO₅/m²/j | 43 g | 5,4 g | 0,3 g | 2,8 g |
| Rendement DBO₅ | 95% | 86% | 32% | 90% |
| Charge appliquée gMES/m²/jour | 51 g | 5,7 g | 0,6 g | 2,8 g |
| Charge éliminée gMES/m²/j | 47 g | 5,1 g | 0,3 g | 2,7 g |
| Rendement MES | 93% | 90% | 56% | 96% |
| Charge appliquée gNK/m²/jour | 9 g | 3,5 g | 2,1 g | 1,8 g |
| Charge éliminée gNK/m²/j | 9 g | 1,5 g | 1,1 g | 1,3 g |
| Rendement NK | 93,9% | 41,3% | 50,6% | 71,0% |
| Charge appliquée gNGL/m²/jour | 9 g | 3,6 g | 2,1 g | 1,8 g |
| Charge éliminée gNGL/m²/j | 5 g | 1,5 g | 1,0 g | 1,2 g |
| Rendement NGL | 55% | 41% | 47% | 69% |
| Charge appliquée gPT/m²/jour | 1,3 g | 0,5 g | 0,4 g | 0,3 g |
| Charge éliminée gPT/m²/j | 1 g | 0,1 g | 0,2 g | 0,1 g |
| Rendement PT | 49% | 21% | 41% | 54% |

* par rapport à la totalité de la surface en service pour Hachenoua et sans tenir compte de la recirculation

**par rapport à la totalité de la surface en service pour Hachenoua en tenant compte de la recirculation

*** en supposant un abattement de 50 % sur le décanteur-digester en tête pour Toto Rossa

****par rapport à la totalité de la surface en service pour Hachenoua

Onema
Hall C – Le Nadar
5, square Félix Nadar
94300 Vincennes
01 45 14 36 00
www.onema.fr

Irstea Lyon
3 bis quai Chauveau
CP 220
69336 Lyon cedex 09
04 72 20 87 87
www.irstea.fr