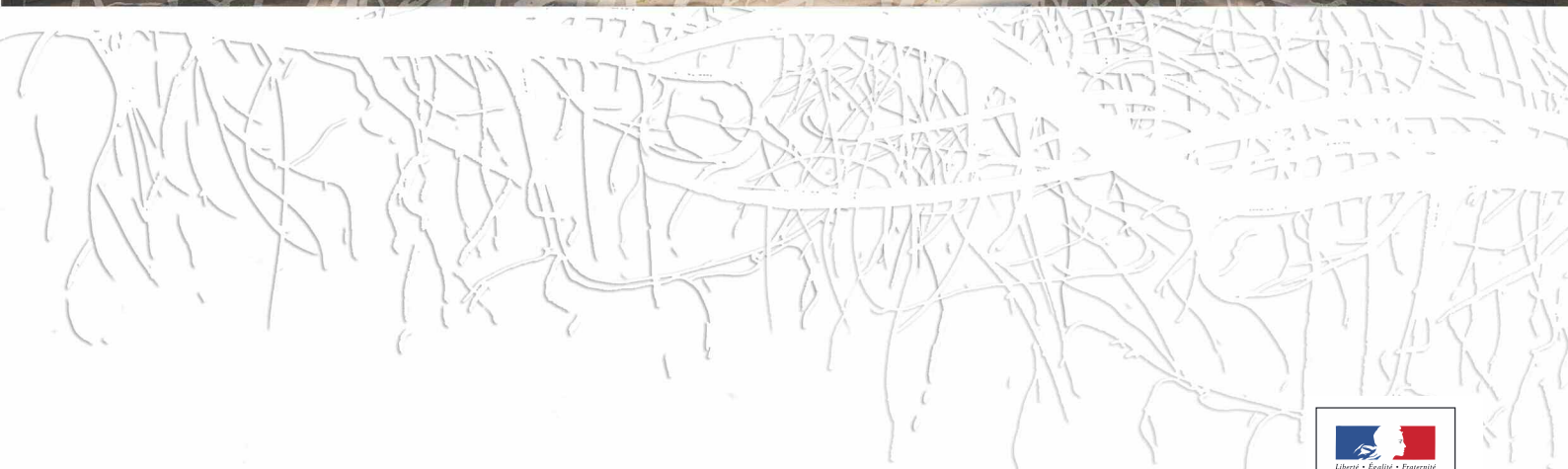


Les filtres plantés de végétaux pour le traitement des eaux usées domestiques en milieu tropical

Guide de dimensionnement de la filière tropicalisée





Auteurs

Rémi LOMBARD LATUNE : ingénieur recherche (Irstea, Epure Lyon),
remi.lombard-latune@irstea.fr

Pascal MOLLE : ingénieur recherche en charge de l'assainissement pour les petites
et moyennes collectivités (Irstea, Epure Lyon), pascal.molle@irstea.fr

Remerciements

Les auteurs remercient pour leur aimable contribution les personnes qui suivent.

■ Pour le suivi des différents systèmes dans les DOM :

Hugues DELANNAY (Office de l'eau Guadeloupe), Nicolas FINA (COTRAM Assainissement), Sarah GOBERT (Office de l'eau Guadeloupe), Bruno GREZILLER (DEAL Mayotte), Gérald LACOMBE (Étiage Guyane), Olivier LAPORTE-DAUBE (Étiage Guyane), Frédéric L'ETANG (SICSM–Espace Sud), Andinani M'GUEREZA (SIEAM), Lucas PELUS (Office de l'eau Martinique), Christophe RIEGEL (SIEAM), Leslie VEREPLA (CANGT).

■ Pour les retours d'expériences sur les phases de construction :

Antoine BAJEUX (Mayotte Bureau d'Études), Nicolas FINA et Patrick LANES (COTRAM Assainissement), Gérald LACOMBE (Étiage Guyane), Julien PHILIPPE (ETG 976).

■ Pour leurs relectures et contributions au guide :

Véronique BARRE, Claire LEVAL et Béatrice GENTIL-SALASC (Agence française pour la biodiversité), Nicolas FINA (COTRAM Assainissement), Laurence HAMONT (CANGT), Gérald LACOMBE (Étiage Guyane), Frédéric L'ETANG (SICSM–Espace Sud), Lucas PELUS (Office de l'eau Martinique).

Les auteurs tiennent également à remercier l'Agence française pour la biodiversité pour son soutien financier et son support pour l'édition de ce guide ainsi que Béatrice SAUREL pour la création et la composition graphiques.

Les filtres plantés de végétaux pour le traitement des eaux usées domestiques en milieu tropical

Guide de dimensionnement de la filière tropicalisée



Rémi LOMBARD LATUNE
Pascal MOLLE



Avant-propos



Ce guide a pour objectif de présenter les filtres plantés de végétaux (FPV) adaptés à la zone tropicale. Les règles de dimensionnement ont été établies et validées à partir du suivi des performances de sept stations en taille réelle, spécialement équipées pour un suivi scientifique et présentes dans quatre départements d'outre-mer (DOM) : Guadeloupe, Guyane, Martinique et Mayotte. Près d'une centaine de bilans 24 heures ont été réalisés dans le cadre de projets de recherches sur une période de plus de dix ans. Ils ont permis de valider les choix techniques présentés ici.

Ce guide ne présente donc pas l'ensemble des configurations de FPV, mais seulement les filières qui semblent particulièrement adaptées au traitement des eaux usées domestiques dans les DOM et en milieu tropical. La « tropicalisation » des filtres étant relativement récente (une dizaine d'années maximum), les prescriptions et recommandations sont susceptibles d'évoluer avec les avancées techniques, le retour d'expériences et les recherches menées sur ces technologies en milieu tropical.

Ce guide est conçu comme un outil d'accompagnement pour la réalisation des FPV en zones tropicales et équatoriales à destination des maîtres d'ouvrages et maîtres d'œuvre. Les aspects liés à l'exploitation font l'objet d'une partie succincte du présent guide et de fiches techniques à part. La question du coût des ouvrages est délicate puisque nécessairement liée aux spécificités de chacun des DOM, aux choix techniques et au développement de ces filières. Leurs coûts ne sont donc volontairement pas abordés dans ce guide, mais des éléments sont disponibles sur demande et des fiches complémentaires pourront être présentées sur le site du groupe de travail Évaluation des procédés nouveaux d'assainissement pour les petites et moyennes collectivités, Epnac (www.epnac.irstea.fr/DOM/). Par ailleurs, ce guide ne constitue pas une norme figeant une technologie : le recours à des concepteurs ou constructeurs spécialisés dans ces techniques de traitement restera indispensable pour une adaptation optimisée à chaque contexte.



FPR et FPV

En France métropolitaine, on parle de FPR, filtres plantés de roseaux, puisque la plante utilisée est le roseau commun (*Phragmites australis*).

En zone tropicale, *Phragmites australis* est considéré comme invasif. De fait, d'autres plantes sont utilisées (partie 4 p. 46) et la filière prend le nom de FPV (filtres plantés de végétaux).

Ce guide comprend cinq chapitres.



1 La partie « **Principes de fonctionnement des FPV** » présente les généralités sur les filtres, en détaillant les processus épuratoires à l'œuvre dans les FPV ainsi que le rôle des végétaux et la gestion des boues dans ce type d'ouvrages. Les différentes variantes des procédés rassemblés sous le vocable FPV sont exposées, avant que ne soient présentées les performances des différentes filières présentes dans la zone tropicale.



2 La démarche à suivre pour la « **Conception d'un système d'assainissement par FPV** » est présentée dans la seconde partie. Les textes réglementaires actuels permettant de définir les niveaux de rejet à atteindre sont rappelés. En fonction de ces derniers, un tableau de synthèse permet de sélectionner la filière la mieux adaptée. Enfin, face au constat unanimement partagé dans les DOM de surdimensionnement des ouvrages, quelques points clés d'évaluation des charges à traiter sont proposés.



3 La troisième partie expose les « **Règles de dimensionnement** » qui président à la définition des caractéristiques des ouvrages. L'étanchéité des ouvrages ainsi que la composition des massifs filtrants sont également détaillées.



4 La question « **Quelles plantes pour les FPV dans la zone tropicale ?** » trouvera sa réponse dans la quatrième partie qui présente la démarche et les résultats produits par une étude spécifique sur le sujet.



5 La dernière partie décrit la « **Mise en œuvre et la gestion des ouvrages** ». Outre les retours d'expériences collectés auprès de constructeurs, les différentes phases rencontrées dans la vie d'un filtre sont détaillées. Quelques points de gestion des ouvrages spécifiques aux contraintes rencontrées dans la zone tropicale sont abordés au titre de compléments au guide d'exploitation des filtres plantés publié par le groupe de travail Epnac en 2015. Enfin, quelques points clés de l'autosurveillance réglementaire sont rappelés.

Pour permettre différents niveaux de lecture en fonction des connaissances du lecteur, des encadrés verts définissent ou donnent des détails sur des concepts clés.

Occasionnellement des paragraphes faisant appel à des connaissances poussées dans le domaine sont identifiés par un encadré marron « Pour aller plus loin ».

Afin d'aller à l'essentiel, les données ou informations importantes sont notées en **caractères gras**.

Enfin, un astérisque (*) est placé à la première occurrence d'un mot qui est expliqué dans le glossaire situé à la fin du guide.



Résumé et mots clés

Les départements d'outre-mer sont porteurs d'enjeux d'assainissement particulièrement sensibles. Une des problématiques majeures provient d'une mauvaise adéquation des technologies, et de leur adaptation, au contexte particulier des DOM.

Afin d'améliorer l'assainissement des petites et moyennes collectivités des DOM, l'Onema puis l'Agence française pour la biodiversité (AFB) a soutenu un travail sur l'adaptation de filières de traitement fiable et adaptées au contexte tropical. Ce guide de dimensionnement des filtres plantés de végétaux (FPV) en zone tropicale fait le point sur dix années de recherches menées à travers les cinq DOM visant à adapter une technologie largement éprouvée en climat tempéré.

Les FPV représentent une famille de procédés relativement variés suivant les types d'écoulements, les niveaux de saturation, etc., et leurs associations, entre eux ou avec des procédés conventionnels, conduisent à une multitude de filières de traitement possible. L'objectif des travaux menés était d'adapter un certain nombre de filières, visant à répondre à différents objectifs de niveaux de traitement, tout en recherchant une compacité des ouvrages qui n'affecte pas la fiabilité et la robustesse de traitement.

Les développements réalisés se concentrent sur la mise en œuvre de filtres à écoulement vertical alimentés en eaux usées brutes pour faciliter la gestion des boues. Les FPV à écoulement vertical sont des massifs de gravier calibrés, isolés du sol, traversés par un réseau d'aération et de drainage et sur lequel des végétaux sont plantés. Ce sont des systèmes de traitement où plusieurs processus interagissent (filtration, activité biologique, écoulements, transferts de gaz, activité végétale...) et dont le fonctionnement pérenne repose sur l'établissement de conditions d'équilibres. Pour cela, aussi bien le dimensionnement que la gestion doivent être réalisés en connaissance de cause.

Une des particularités de l'adaptation des FPV au climat tropical est liée à la réduction de l'emprise des filtres. En effet, les fortes et régulières températures en climat tropical autorisent de mettre en œuvre des périodes de repos de la même durée que les périodes d'alimentation tout en garantissant une bonne minéralisation des boues. À ce titre, seulement deux filtres sont mis en parallèle permettant *de facto* de diminuer l'emprise des ouvrages par rapport à ce qui est mis en œuvre en métropole.

De même, l'effort a été mis pour développer des systèmes innovants permettant de travailler sur un seul étage de traitement suivant les niveaux de rejets. Si le dimensionnement des FPV se réalise sur la base de charge (organiques, hydrauliques) acceptable sur le filtre en fonctionnement, il peut tout de même être mentionné les ordres de grandeurs de surface de filtre par équivalent habitant nécessaire à mettre en œuvre. Suivant les niveaux de rejets demandés, des surfaces de 0,8 m²/EH à 1,6 m²/EH sont mises en œuvre. La configuration la plus simple garantit des performances au-delà du minimum réglementaire (75 %, 80 %, 80 % et 60 % d'abattement respectivement pour DCO, DBO₅, MES et NTK avec des concentrations de sortie inférieures à 125 mg DCO/L). En fonction des besoins et des contraintes, les FPV peuvent être adaptés pour garantir un traitement du carbone supérieur à 95 %,

une nitrification totale ou un traitement de l'azote total de 70 %. Ces dimensionnements permettent de garder une forte acceptation de surcharges hydrauliques de temps de pluie sans compromettre la fiabilité des ouvrages.

Les plantes, par leur action mécanique, sont indispensables au fonctionnement des FPV. *Phragmites australis* est utilisé en France métropolitaine comme à l'étranger. Cependant, cette espèce n'est pas présente naturellement dans la zone tropicale où elle présente un risque invasif marqué. Une étude spécifique sur la question des plantes de substitution à utiliser en zone tropicale a permis d'évaluer une centaine d'espèces en trois temps : bibliographie, essais en pilotes et comportement en taille réelle. *Heliconia psittacorum*, l'oiseau du paradis, est la plus intéressante, même si d'autres solutions sont proposées pour s'adapter aux contraintes de chaque projet.

Une des clés du succès des filtres plantés en métropole est la simplicité d'exploitation des ouvrages. Avec peu, voire pas de matériel électromécanique et donc pas d'électricité si la topographie le permet, les tâches de l'exploitant sont simples et les risques de pannes faibles. L'entretien des végétaux est plus contraignant en zone tropicale et constitue la principale tâche de l'exploitant.

La compacité de la filière tropicale permet à la fois de venir concurrencer les procédés conventionnels quand le foncier disponible est limité, mais aussi d'être compétitif au-delà de la capacité économique limite définie en métropole (5 000 EH). La plage d'utilisation des FPV est donc large, de l'ouvrage semi-collectif pour des lotissements ou des bourgs isolés, aux centres urbains de taille moyenne.

Les préconisations de ce guide, construit dans le cadre de recherches réalisées en outre-mer français, peuvent être utilisées dans l'ensemble de la zone tropicale.

Après une description des processus mis en jeu dans ces ouvrages et les performances des différents procédés étudiés, ce guide présente les différents aspects à prendre en compte dans l'élaboration d'un projet d'assainissement, c'est ainsi qu'il présente :

- les caractéristiques des eaux usées des petites collectivités des DOM et la relation entre l'habitant et l'équivalent habitant ;
- un rappel des règles de détermination de niveau de rejet ;
- les choix technologiques au regard des contraintes locales et des éventuels phasages à réaliser ;
- les règles précises de dimensionnement et de conception des ouvrages ;
- les différentes plantes qui peuvent être utilisées ;
- le détail des tâches d'exploitation et de surveillance à réaliser pour une gestion optimum des ouvrages.

Mots clés : assainissement, petites collectivités, gestion des boues, zone tropicale, filtres plantés



Sommaire

8 Introduction

10 1. Principes de fonctionnement des FPV

1.1 Filtre à écoulement vertical non saturé

1.2 Les différentes configurations de la filière tropicalisée

Recirculation

Filtre vertical non saturé / saturé

Second étage

17 1.3 Processus épuratoires et pilotage du système

Rétention physique et gestion des boues

Traitement biologique et aération

Traitement de l'azote, filtration et épaisseur du massif filtrant

19 1.4 Rôle des végétaux

19 1.5 Performances épuratoires des FPV en zone tropicale

Caractéristiques des eaux usées domestiques des DOM, prise en compte de l'impact des temps de pluies

Performances des différents procédés de filtres plantés en climat tropical

Performances des FPV à l'échelle de la filière

28 2. Conception : objectifs de traitement, charges à traiter et stratégie

28 2.1 Niveaux de rejet

Exigences réglementaires

Le milieu récepteur

29 2.2 Choix de la filière à mettre en œuvre

31 2.3 Estimation des charges à traiter

Définition de l'EH tropical

Coefficients correcteurs pour le dimensionnement des ouvrages

Phasage des projets dans le temps

36 3. Règles de dimensionnement et matériaux

36 3.1 Protection des ouvrages

37 3.2 Dimensionnement des filtres

Ratios de dimensionnement

Mode constructif

Hauteur de revanche

39 3.4 Ouvrages et réseau d'alimentation

Caractéristiques des bâchées

Alimentation gravitaire

	Alimentation par un poste de relevage
	Réseau d'alimentation
41	3.5 Réseau d'aération-drainage
42	3.6 Étanchéité et matériaux
	Etanchéité artificielle, naturelle et infiltration
	Matériaux de garnissage des filtres
43	3.7 Dimensionnement des filtres horizontaux
	L'hydraulique
	Dégradation des polluants
46	4. Quelles plantes pour les FPV dans la zone tropicale ?
47	4.1 Résultats de l'étude
	Les Zingibérales
	Les Cypéracées
	Les Poacées
50	4.2 Herbier pour les FPV dans les DOM
52	5. Mise en œuvre et gestion des ouvrages
52	5.1 Mise en œuvre des FPV
	Retours d'expériences de la construction
	Liste des documents à fournir et des essais à réaliser par le constructeur
	Incidents majeurs ayant impacté les stations
55	5.2 Les différentes phases de fonctionnement des filtres
	Plantation des végétaux et phase de démarrage des FPV
	Fonctionnement normal
	Fonctionnement dégradé
	Curage des boues
	Colmatage irréversible
57	5.3 Gestion des ouvrages dans la zone tropicale
	Tropicalisation des installations
	Entretien des végétaux
	Synthèse des tâches à effectuer
	Retours d'expériences de la Guyane
60	5.4 Autosurveillance réglementaire
	Production documentaire
	Métrologie et réalisation de l'autosurveillance
64	6. Conclusion
66	7. Glossaire
67	8. Sigles et abréviations
68	9. Table des figures, des tableaux et des encadrés
70	10. Bibliographie



Introduction



Le système français des filtres plantés de roseaux (FPR) a été développé par l'Institut national de la recherche scientifique et technique pour l'environnement et l'agriculture (Irstea¹) à partir des années 1980. Il présente une originalité dans la famille des *constructed wetland* dont il fait partie puisque l'alimentation des filtres se fait par des eaux brutes permettant un traitement conjugué des eaux et des boues sur un même ouvrage. C'est, à l'heure actuelle, le système de traitement plébiscité par les petites collectivités : on estime que 80 % des stations de moins de 2 000 équivalent-habitants (EH) qui sont construites chaque année sont des FPR.

Les travaux d'Irstea dans la zone tropicale ont démarré en 2005 en partenariat avec le Syndicat intercommunal d'eau et d'assainissement de Mayotte (SIEAM). Les deux premiers FPV en zone tropicale ont été mis en service à Mayotte en 2006 (Hachenoua : 110 EH et Totorossa : 145 EH).

À partir de 2010, l'Office national de l'eau et des milieux aquatiques (Onema, devenu en 2017 Agence française pour la biodiversité, AFB) demande à Irstea de travailler sur le développement de filières de traitement des eaux adaptées aux petites collectivités de l'outre-mer. Un diagnostic de la situation dans les différents départements montre que la technologie la mieux à même de répondre aux enjeux des DOM est celle des FPR (Eme, 2012). Grâce à un travail conjoint avec des techniciens locaux, plusieurs stations voient le jour en Guyane (Bois d'Opale 1 [300 EH] en 2010 et Bois d'Opale 2 [480 EH] en 2012), Martinique (Mansarde Rancée [1000 EH] en 2013 et Taupinière [900 EH] en 2014), Guadeloupe (Les Mangles [120 EH] en 2015), Mayotte (Champ d'Ylang 2 [180 EH] en 2015) et La Réunion (Salazie [90 EH] en 2017).

Le projet Attentive (assainissement des eaux usées adapté au contexte tropical par traitement extensif utilisant des végétaux) qui se focalise sur les Antilles reçoit en octobre 2014 des mains de la ministre de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, le prix du génie écologique dans la catégorie « Gestion alternative des eaux usées et pluviales ».

Cette reconnaissance nationale des FPV en zone tropicale devrait permettre de faciliter son acceptation par les décideurs locaux. La figure 1A montre qu'il a fallu attendre près de 15 ans en métropole avant que le nombre de filtres plantés ne décolle. Toute proportion gardée, les choses semblent similaires à Mayotte, et après 8-10 ans, la filière semble avoir la confiance des maîtres d'ouvrage (Figure 1B). Le schéma directeur d'assainissement de Mayotte de 2015 fait des FPV la filière la plus représentée en nombre de stations dans le futur parc de l'île.

En Guyane, six FPV ont vu le jour depuis 2010 et une maîtrise d'œuvre publique pour un filtre de 3 000 EH a été récemment lancée en 2017 par la Communauté de communes du Centre Littoral. Ce choix, pour un ouvrage d'une telle capacité de traitement, démontre le fort intérêt perçu par la collectivité sur les retours positifs de la filière ces dix dernières années.

Équivalent-habitant (EH)

L'EH est l'unité de mesure permettant d'évaluer la capacité d'une station d'épuration. Elle se base sur la quantité de polluants émis par une personne dans une journée. La directive européenne du 21 mai 1991 définit l'EH comme « la charge organique biodégradable ayant une demande biochimique en oxygène à 5 jours (DB05) de 60 grammes d'oxygène par jour ». La quantité réelle émise par une personne change en fonction du contexte (partie 2.3.1 p. 32).

1- À l'époque Cemagref, Centre national du machinisme agricole, du génie rural et des eaux et forêts, qui est devenu Irstea en 2011.

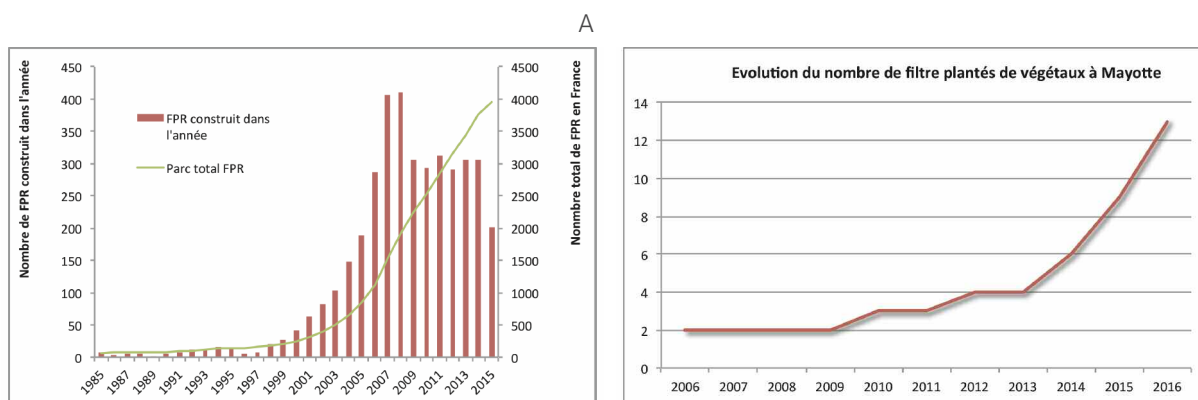


Figure 1. Évolution du nombre de filtres plantés de végétaux (FPV) en métropole (A) et à Mayotte (B) (Base de données ERU, SIEAM).

Les FPV présentent de nombreux intérêts pour la zone tropicale et apportent des garanties au maître d'ouvrage :

- **robustesse**, au sens de capacité à maintenir un niveau de traitement élevé (partie 1.5 p. 19) malgré d'importantes variations de charges organiques et hydrauliques ;
- **simplicité d'exploitation**, puisque l'entretien de ce type de station ne requiert pas de connaissances techniques particulières et demande peu de temps (environ 300 heures de travail par an pour une station de 1 000 EH ; partie 5.3 p. 57) ;
- **utilisation de matériaux** locaux pour la construction, puisque les supports pour le développement de la biomasse sont des graviers et que peu d'équipements électromécaniques (exogènes) sont nécessaires en comparaison à d'autres technologies ;
- **gestion des sous-produits** facilitée, les filtres étant alimentés avec les eaux usées brutes, un traitement des boues est réalisé en surface de filtre (partie 1.3 p. 17). En métropole, les boues doivent être exportées tous les 10-15 ans et peuvent être valorisées directement en agriculture ;
- **filière sobre**, qui n'utilise pas de produits chimiques et peut même s'affranchir d'électricité quand la topographie du site le permet (écoulement gravitaire ; partie 3.3 p. 39) ;
- **acceptation du temps de pluie** possible en cas de réseau unitaire. Des lames d'eau occasionnelles de plus de 5 m ont été envoyées sur des filtres, soit 15 fois la charge nominale ! (Arias Lopez, 2013) ;
- **relative compacité** (0,8 à 1 m²/EH) par rapport à d'autres systèmes extensifs (lagunage naturel 5 à 6 m²/EH en climat tropical) ou même par rapport à la filière classique en métropole (2 à 2,5 m²/EH) ;
- **phasage des projets** dans le temps (partie 2.3.3 p. 33 et Figure 17 p. 34). Les filtres sont divisés en lits qui peuvent être construits ou mis en service au fur et à mesure de l'évolution des besoins. Ce qui est particulièrement intéressant dans les DOM où la croissance démographique est importante et où les investissements sont faits à long terme.

Principes de fonctionnement des FPV

1

Cette première partie présente les généralités sur la filière de traitement des FPV adaptée au climat tropical et ses différentes variantes. Les processus épuratoires des différentes étapes du traitement sont décrits. Une synthèse de l'ensemble des suivis réalisés illustre les performances épuratoires des procédés. Enfin la question des boues et de leur gestion est abordée.

Ces types de systèmes sont souvent appelés « phytoépuration » dans la mesure où ils mettent en œuvre des végétaux. Cependant, le rôle des végétaux (Epnac, 2014) dans l'épuration des eaux est négligeable au regard de l'action des bactéries. On parlera alors de filières de traitement végétalisées.

1.1. Filtre à écoulement vertical non saturé

Les FPV s'inspirent des capacités épuratoires naturelles des écosystèmes des zones humides. Initiée en Allemagne dans les années 1960-80, la recherche sur ces procédés de traitement extensif par culture fixée sur support fin s'est répandue sur le continent nord-américain et au Nord de l'Europe (Danemark, Royaume-Uni) dans la décennie 1970. Dans les années 1980, Irstea (à l'époque Cemagref) démarre des expérimentations pour établir les règles de dimensionnement de ce qui deviendra le système français. Son originalité est de traiter conjointement les eaux usées et les boues dans un même système, à écoulement vertical, aérobie et produisant un dépôt organique stable et valorisable en agriculture.

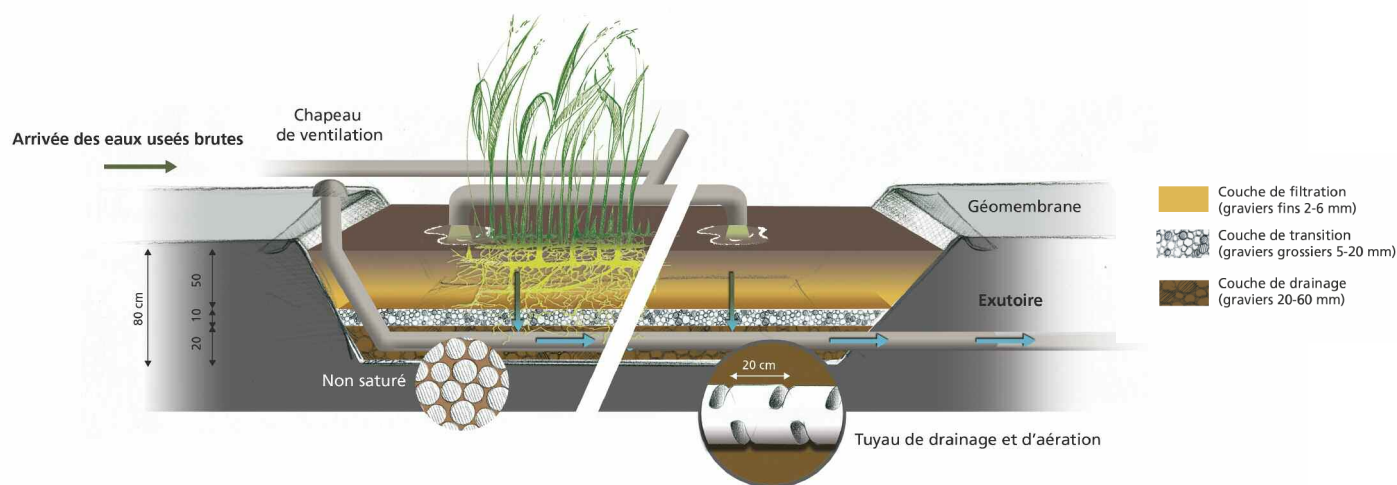


Figure 2. Coupe transversale schématique d'un filtre planté de végétaux (FPV) à écoulement vertical (Dessin Saurel pour AFB).

Un FPV à écoulement vertical est un massif de graviers, isolé du sol artificiellement, traversé par un réseau d'aération-drainage et sur lequel des végétaux sont plantés (Figure 2). Les eaux usées brutes sont déversées à la surface du filtre par bâchées* (volume important correspondant à une lame d'eau de 2,5 cm répartie sur l'ensemble du filtre). Elles vont percoler à travers le massif filtrant avant d'être collectées par le système de drainage.

Les matières en suspension (MES) contenues dans l'effluent sont filtrées par la couche de graviers la plus fine et retenues à la surface de l'ouvrage. Elles s'accumulent en formant une couche de dépôt qui renforce la capacité de rétention physique du filtre. C'est une couche biologiquement très active qui se minéralise rapidement.

Les matières dissoutes sont dégradées par la biomasse bactérienne qui se développe sur les graviers composant le massif filtrant et dans le dépôt organique. Afin de favoriser les bactéries ayant un métabolisme aérobie, le système est conçu de manière à garantir une bonne oxygénation du massif. Les plantes présentes à la surface du filtre participent à cette oxygénation à travers leur rôle mécanique. Sous l'action du vent, leurs tiges vont former des anneaux dans la couche de boues accumulées à la surface du filtre (Figure 3). Ces anneaux vont permettre d'éviter le colmatage de surface du système en facilitant l'infiltration des eaux usées et les échanges de gaz.



Figure 3. Illustration du rôle mécanique des végétaux sur les lits de séchage de boues plantés de roseaux.

La biomasse bactérienne va utiliser l'oxygène de l'air présent dans le massif et la matière organique dissoute pour son métabolisme. Pour garantir la pérennité de la station, tout l'enjeu de la gestion des filtres est de contrôler cette croissance bactérienne qui va tendre naturellement à occuper l'espace disponible entre les graviers, conduisant au colmatage du système. Les eaux usées ne pourront plus s'infiltrer et les échanges de gaz ne se feront plus. C'est pour cette raison que les filtres verticaux sont alimentés en alternance. La filière tropicale comprend deux filtres, qui sont alimentés chacun leur tour pendant 3,5 jours (Figure 4). On distingue donc la phase d'alimentation du filtre de sa phase de repos. Au cours de cette dernière, en l'absence d'eaux usées, la population bactérienne va s'autoréguler, contrôlant ainsi la biomasse produite.

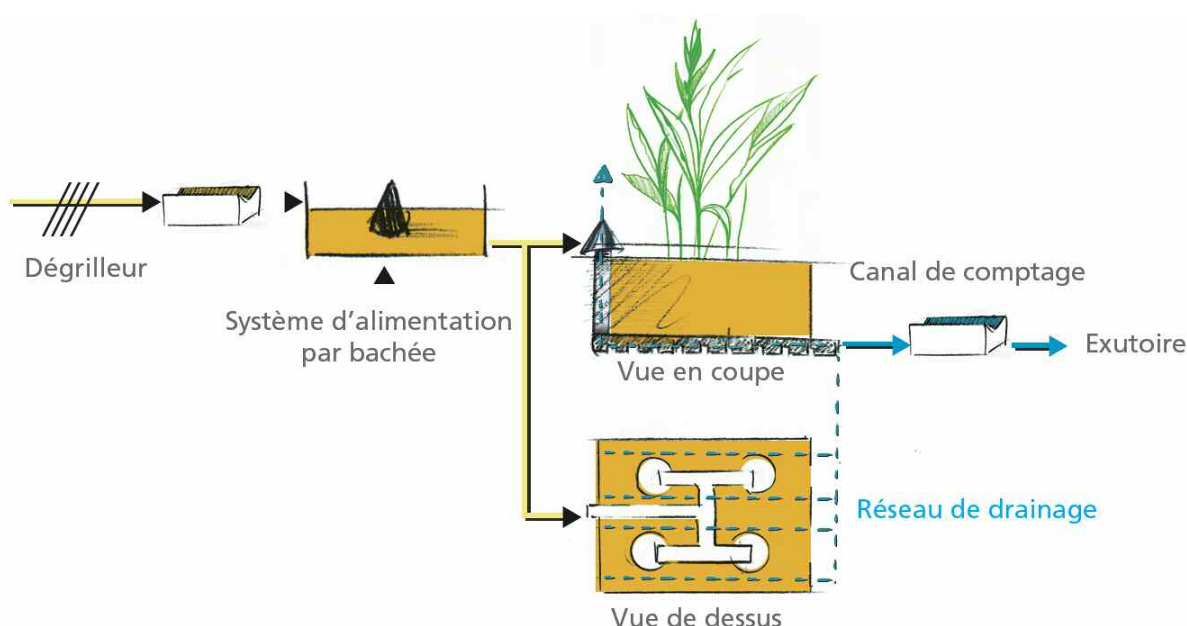


Figure 4. Schéma de la filière tropicale.

Par rapport à la filière classique métropolitaine (Figure 5), la filière tropicale simple ne comporte qu'un unique étage de traitement composé de deux filtres fonctionnant en alternance. Les températures moyennes plus élevées favorisent l'activité biologique et permettent dans de nombreux cas (suivant les niveaux de rejet demandés) de s'affranchir d'un second étage. L'avantage est conséquent en termes d'emprise au sol et simplifie également les besoins en matériaux ; le second étage de traitement comporte une couche de sable difficile à se procurer dans les DOM.

La filière classique métropolitaine

En France métropolitaine, l'activité bactérienne est moindre en raison des faibles températures en hiver. Les périodes de repos permettant un rééquilibrage de la biomasse doivent être plus longues. Le système est alors composé de trois filtres en parallèle pour avoir une période de repos double de celle d'alimentation.

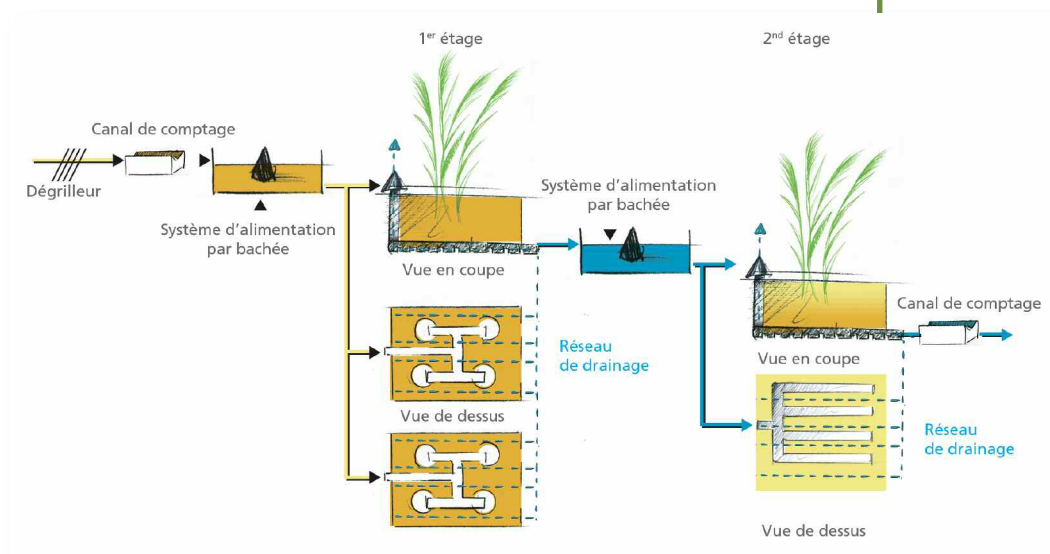


Figure 5. Schéma de la filière classique métropolitaine.

1.2. Les différentes configurations de la filière tropicalisée

En fonction des niveaux de rejet à atteindre, la filière peut être modifiée pour améliorer les performances sur certains paramètres. Il est ainsi possible de mettre en place :

- une boucle de recirculation ;
- un fond saturé ;
- un second étage de traitement ou un module de désinfection.

Le paragraphe 2.2 p. 29 revient en détail sur le choix de la variante à mettre en œuvre en fonction des objectifs de traitement.

1.2.1. Recirculation

Une boucle de recirculation des eaux traitées sur un seul étage de traitement peut être mise en place. Elle nécessite un regard de recirculation et éventuellement un poste de relevage qui renvoie une partie des effluents en tête de station.

Calcul du taux de recirculation

Taux de recirculation (%) =
(débit recirculé/débit sortant)
x 100

Un taux de recirculation de 100 % signifie qu'il y a autant d'eau recirculée que d'eau qui sort de la station ; ce qui revient à doubler la charge hydraulique reçue par le filtre en fonctionnement.

La recirculation permet :

- de diluer les eaux brutes et ainsi de diminuer la production d'H₂S dans le poste de relevage, ouvrage généralement propice à l'émission de mauvaises odeurs dans les DOM ;
- d'augmenter le temps de séjour des eaux usées dans le système et ainsi d'améliorer une partie du traitement (DCO, DBO₅) ;
- d'assurer une hydratation convenable des végétaux lorsque la station est en sous-charge, en saison sèche notamment.

En contrepartie, la recirculation augmente la lame d'eau quotidienne appliquée sur le filtre et amplifie les phénomènes de surcharge hydraulique fréquents en saison des pluies. Prost-Boucle et Molle (2012) ont montré qu'il n'est pas intéressant d'aller au-delà d'un taux de recirculation de 100 % sous peine d'impacter négativement la nitrification en climat métropolitain (charge hydraulique inférieure à 75 cm/j sur le filtre en fonctionnement). Cette limite reste à confirmer en climat tropical. En tout état de cause, la recirculation limite l'acceptation des temps de pluie par rapport à une filière sans recirculation

La recirculation implique un apport d'électricité sur la station pour mettre en œuvre un poste de relevage, soit en tête de station pour réaliser les bâchées (la recirculation est alors gravitaire), soit en sortie de filtre pour gérer la recirculation. Lorsque la recirculation

est gérée gravitairement, elle se fait à l'aide d'une lame crénelée réglable accessible au niveau du regard de recirculation (Figure 6). Dans le cas d'une recirculation par poste de relevage, il est très fortement conseillé que les eaux traitées puissent s'évacuer gravitairement pour éviter une mise en charge des filtres en cas de panne ou de coupure de courant.

Au niveau du suivi des performances de l'installation, la présence d'une boucle de recirculation induit le calcul des performances à deux niveaux :

- les rendements de la station entre les eaux brutes et les eaux traitées ;
- les rendements du filtre en fonctionnement entre les eaux appliquées (eaux brutes + eaux recirculées) et les eaux traitées.



Figure 6. Lame crénelée pour recirculation manuelle.

1.2.2. Filtre vertical non saturé/saturé

Les FPV à écoulement vertical classiques sont des systèmes entièrement aérobies. Dans ces conditions, les processus de dégradation anoxiques (dénitrification en particulier) ne peuvent pas avoir lieu. La mise en place d'une zone saturée en fond de filtre permet l'installation de conditions anoxiques qui seront le siège d'un traitement plus poussé de certains composants (Figure 7). Cela correspond à superposer un filtre à écoulement vertical non saturé sur un filtre à écoulement horizontal.

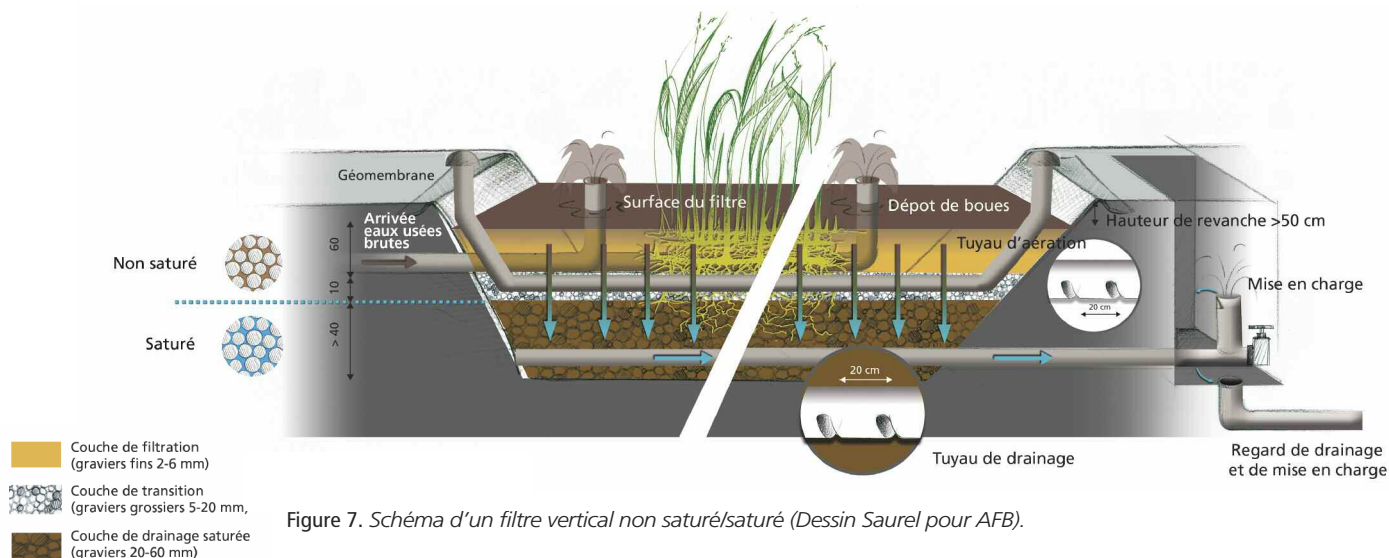


Figure 7. Schéma d'un filtre vertical non saturé/saturé (Dessin Saurel pour AFB).

- Outre une hauteur de massif plus importante, la mise en place d'un fond saturé nécessite :
- un réseau d'aération intermédiaire 5 à 10 cm au-dessus du niveau haut de la partie saturée pour maintenir les conditions aérobies sur la partie haute du filtre ;
 - un regard de mise en charge dans lequel la hauteur de la zone saturée peut être contrôlée.

La hauteur de la zone saturée influe sur les conditions d'oxydo-réduction, le temps de séjour de l'effluent dans le système et la vitesse d'écoulement dans la porosité. Par ailleurs, la zone saturée doit être partiellement vidangée tous les ans pour éviter son colmatage. Les eaux de vidange sont alors renvoyées en tête de station pour que les dépôts soient retenus à la surface des filtres.

L'aménagement d'un fond saturé permet principalement de :

- **pousser le traitement de l'azote total** en installant une zone anoxique, condition indispensable pour une dénitrification ;
- améliorer les performances sur la **dégradation du carbone** par une consommation supplémentaire liée à la dénitrification ;
- **piéger les MES** résiduelles et ainsi garantir un niveau de rejet en MES inférieur à 25 mg/L, condition indispensable pour le fonctionnement de modules UV.

1.2.3 Second étage

La filière tropicale simple ne comprend qu'un seul étage, mais il est possible d'ajouter, lorsque les niveaux de rejet à atteindre sont très contraignants, un second étage de traitement. Plusieurs types de technologie sont envisageables.

■ Filtre à écoulement vertical non saturé

En second étage, le filtre vertical suit les mêmes règles de dimensionnement que pour le premier étage (partie 3.2 p. 37), mais avec les charges appliquées suivantes : charge hydraulique 0,37 m/j, 70 gDCO/m²/j, 20 gDBO₅/m²/j, 30 gMES/m²/j et 15 gNTK/m²/j.

Par contre, le réseau d'alimentation est différent : il se compose d'un réseau superficiel de canalisations en charge, percées d'orifices supérieurs à 8 mm de diamètre (Figure 8). L'alimentation se fait par bâchées comme pour le premier étage.



Figure 8. Alimantation sur le 2^e étage de la station de Mansarde Rancée (Martinique) avant plantation, février 2014.

Par rapport à un filtre de premier étage (partie 3.5.2 p. 42), il y a des différences dans la composition des trois couches de graviers :

- couche de filtration : 30 cm de sable ($0,25 < d_{10} < 0,4$ mm, $d_{60}/d_{10} < 5$) ;
- couche de transition : 10-20 cm de graviers 3/10 mm ;
- couche de drainage : 10-20 cm de graviers 20/60 mm.

Un second étage vertical permet de **pousser le traitement de l'ammonium** ($> 90\%$) ainsi que de **garantir des niveaux de sortie faibles en MES** ($< 25\text{ mg/L}$) et en DCO ($< 90\text{ mgO}_2/\text{L}$). La difficulté à trouver du sable dans les DOM risque de limiter le nombre de filtres verticaux en second étage. Cette configuration peut être intéressante dans les sites où il y a peu de profondeur de sol : on peut ainsi se retrouver avec deux étages de filtres de 60 cm de profondeur. Si le dénivelé le permet, cette filière permet de surcroît de travailler gravitairement pour un traitement aérobie poussé.

■ Filtre à écoulement horizontal

Dans les filtres à écoulement horizontal, le massif filtrant est totalement saturé en eau. L'effluent est réparti sur toute la largeur et la hauteur du filtre par un système répartiteur situé à une extrémité du bassin ; il s'écoule ensuite dans un sens principalement horizontal au travers du substrat. La plupart du temps, l'alimentation est continue car la charge organique apportée est faible et la surface relativement importante (Figure 9).

L'évacuation des eaux traitées se fait par un drain placé au fond, à l'extrémité opposée du filtre, et enterré dans une couche de pierres drainantes. Ce tuyau est relié à une mise en charge permettant de régler la hauteur de surverse, et donc celle de l'eau dans le casier* de façon à ce qu'il soit saturé. Le niveau d'eau doit être maintenu environ à 5 cm sous la surface du matériau. Ceci permet d'éviter les écoulements préférentiels en surface et d'assurer un flux homogène.

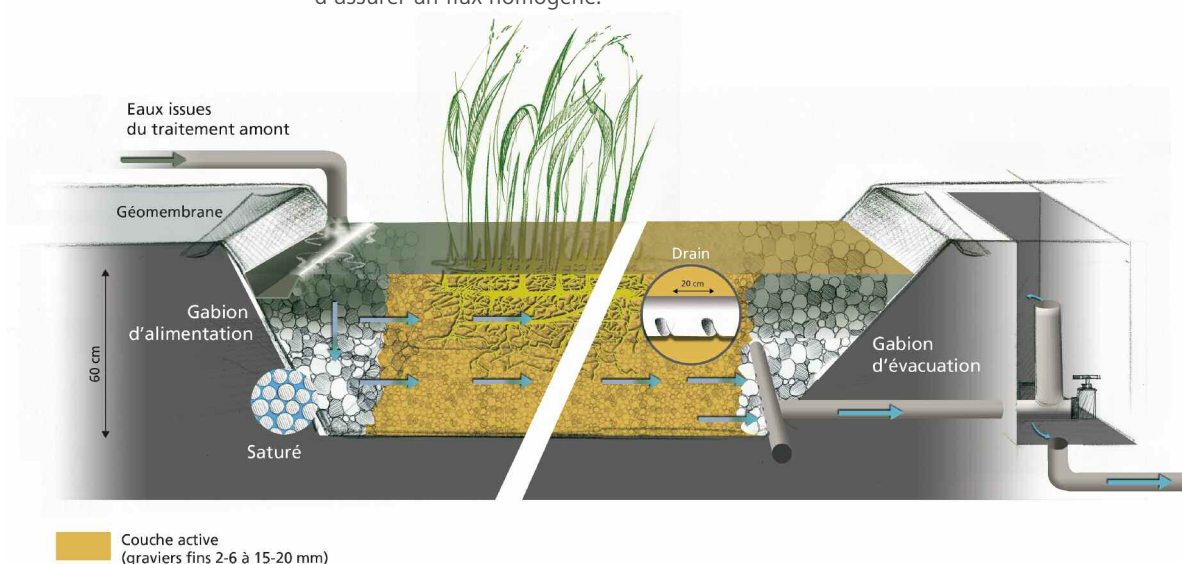


Figure 9. Schéma d'un filtre à écoulement horizontal (Dessin Saurel pour AFB).

Le filtre à écoulement horizontal doit être obligatoirement précédé d'une étape de traitement primaire. Son association à un décanteur a été testée à Mayotte (station de Totorossa). Le filtre a été très rapidement colmaté en raison d'une exploitation peu rigoureuse du décanteur. Cette expérience montre bien la fragilité des filtres à écoulement horizontal, notamment lorsqu'ils sont placés après un traitement primaire sensible aux variations de charges (épisodes pluvieux en particulier). Placé en aval d'un filtre à écoulement vertical, un second étage horizontal bien dimensionné peut cependant être intéressant. Nous détaillerons uniquement cette dernière combinaison, plus fiable, particulièrement en contexte tropical où les surcharges hydrauliques peuvent être conséquentes en réaction à des épisodes pluvieux intenses.

Compte tenu de la saturation du milieu, l'apport en oxygène est relativement faible et se fait essentiellement par diffusion depuis la surface, mais aussi, dans une moindre mesure, par relargage d'oxygène depuis les racines des plantes : effet rhizosphère. Ces conditions induisent l'installation d'un milieu anoxique et le développement d'une flore microbienne qui lui est adaptée. Les processus de dégradation anoxique permettent notamment la réduction des nitrates en azote gazeux (dénitrification).

Un second étage horizontal peut permettre une dénitrification complète (si le carbone n'est pas limitant) et donc une **réduction de l'azote total dans les proportions de la part d'azote nitrifié. Il complète le traitement du carbone et des MES (< 25 mg/L).**

■ Lit bactérien à très faible charge

La station de Taupinière en Martinique est composée d'un lit bactérien à très faible charge en second étage. Ce dernier est un massif de 150 cm de haut de roche volcanique 20/60 mm. Le système d'alimentation est composé de deux réseaux de canalisations percées d'orifices, disposés en quinconce (Figure 10). L'alimentation se fait en alternance sur chacun des réseaux, par banchées d'un volume correspondant à une lame d'eau de 3 cm, toutes les 5 minutes. Ce mode d'alimentation permet le décollement du biofilm excédentaire se développant sur les blocs. En fond de lit, des casiers permettent de ménager une zone dans laquelle se fera la séparation entre les eaux traitées et les boues secondaires. Ces dernières sont soutirées entre 1 et 4 fois par jour et repartent en tête de station.

Le lit bactérien est dimensionné à très faible charge : avec une hauteur de 1,5 m de matériaux de surface spécifique de $150 \text{ m}^2/\text{m}^3$, la charge surfacique est de $3,5 \text{ g DBO}_5/\text{m}^2/\text{j}$.

Dans ce type d'ouvrage, les apports d'oxygène sont importants, permettant un **traitement très poussé de l'azote réduit** (NTK < 10 mg/L). Sa compacité (aux alentours de $0,1 \text{ m}^3/\text{EH}$) et le fait qu'il permette de s'affranchir de l'utilisation de sable en font une option intéressante. Mais il présente aussi des inconvénients : le principal tient au fait qu'une boucle de recirculation est indispensable pour assurer une alimentation suffisante. En cas de surdimensionnement de la station (très fréquent), il peut arriver que les eaux soient recirculées plusieurs dizaines de fois avant de sortir de la station. Généralement, un second système de pompage est nécessaire pour renvoyer les boues soutirées en tête de station.

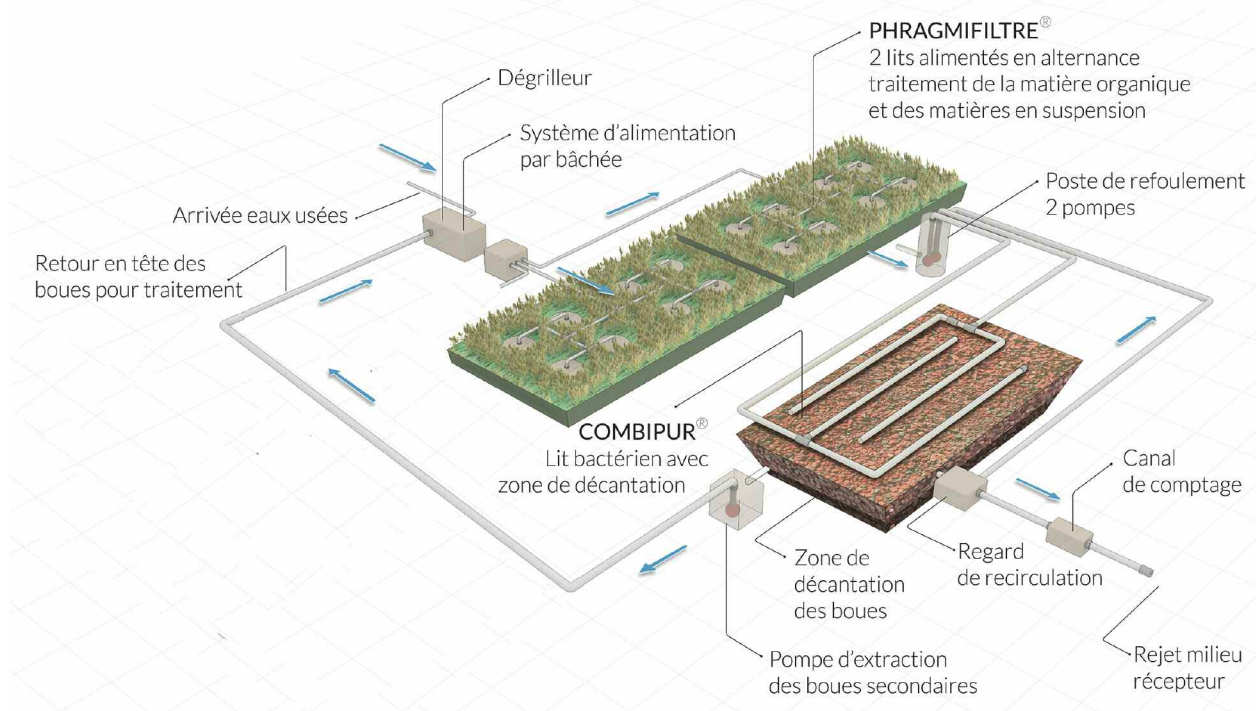


Figure 10. Lit bactérien à faible charge en second étage (Source : système Combipur).

1.3 Processus épuratoires et pilotage du système

Cette partie détaille les différents mécanismes participant au traitement des eaux par un FPV, ainsi que la manière de conduire le système en maintenant les conditions indispensables au bon fonctionnement des ouvrages.

1.3.1 Rétention physique et gestion des boues

Les eaux usées brutes sont déversées à la surface du filtre. La fraction particulaire de la matière organique est retenue à la surface du filtre par un mécanisme physique de filtration. Cette couche de boues qui se crée est très riche en micro-organismes qui vont rapidement minéraliser la matière organique.

L'épaisseur de la couche augmente de 2,5 cm par an en métropole, ce qui participe à l'amélioration des performances du système au cours du temps (rétention physique, activité biologique). Cependant, l'accumulation de boues à la surface du filtre perturbe l'écoulement des eaux usées à travers le filtre et les échanges gazeux entre l'atmosphère et le filtre. Trois composantes du système permettent de lutter contre cet effet colmatant à court, moyen et long termes :

- les tiges des plantes, à travers leur action mécanique sur la couche de dépôts, permettent de maintenir en permanence la conductivité hydraulique et les échanges gazeux du système (partie 1.4 p. 19) ;
- l'alternance entre les différents filtres permet de ménager des périodes de repos indispensables à la minéralisation de la matière organique accumulée au cours de la phase d'alimentation ;
- un curage de la couche de boues accumulée à la surface du filtre est nécessaire une fois que cette dernière a atteint une vingtaine de centimètres (en pratique, tous les 10 à 15 ans en métropole).

En zone tropicale, la vitesse de minéralisation de la matière organique est beaucoup plus importante, à tel point qu'il n'a pas été possible d'évaluer précisément l'accumulation des boues au cours du temps lors des suivis réalisés jusqu'à présent. Une chose est certaine : elle est moindre qu'en métropole. Ce qui a des conséquences sur les trois opérations de gestion des boues :

- le rôle mécanique des végétaux est toujours fondamental, mais la moindre quantité de boues devrait permettre d'élargir le choix des espèces à des plantes avec une densité de tiges plus faible ;
- la vitesse de minéralisation plus importante de la matière organique entraîne une réduction de la période de repos entre deux cycles d'alimentation. La période de repos a ainsi la même durée que la période d'alimentation, ce qui amène à réduire le nombre de

filtres en parallèle à deux (au lieu de trois classiquement en métropole) ;

- la fréquence de curage des boues est diminuée et pourrait être supérieure à 15 ans.

La rétention physique à la surface du filtre est une étape très importante du traitement. Elle est responsable de la **majeure partie de l'abattement des MES** dans le système. La fraction particulaire de la pollution carbonée est retenue à la surface des filtres et représente plus **d'un tiers de la charge en DCO**. Des formes azotées et phosphatées particulières sont également éliminées. C'est enfin dans cette couche de boues que l'on retrouve certains **micropolluants** qui sont retenus par le système (Choubert, 2011).



Figure 11. Opération de curage des boues en Guyane sur Bois d'Opale 1. Ces boues peuvent être valorisées en agriculture (Epnac, 2014).

1.3.2 Traitement biologique et aération

Les FPV font partie de la famille des traitements biologiques par culture fixée sur support fin. La biomasse épuratrice se développe sur les graviers qui composent le massif filtrant et forme une matrice, le biofilm. Ce dernier est un amas organique composé de polysaccharides sécrétés par les bactéries épuratrices. Il sert d'interface entre les bactéries et le milieu extérieur. La matière organique dissoute/nutriment va pénétrer dans le biofilm par simple diffusion selon le gradient de concentration. Les FPV sont des systèmes aérobies, les bactéries utilisent l'oxygène dissous pour leur métabolisme. On rencontre plusieurs types de bactéries à l'intérieur du filtre. Dans les premiers centimètres, on retrouve la principale activité des bactéries hétérotrophes, responsables de la dégradation des matières carbonées. Leur métabolisme très dynamique leur permet de prendre le dessus sur les bactéries autotrophes qui dégradent l'azote ammoniacal selon des processus plus lents. Ces dernières se retrouvent sur une plus grande amplitude de profondeur.

Le maintien des conditions aérobies à l'intérieur du filtre est fondamental. Pour ce faire, les eaux usées sont apportées ponctuellement par gros volumes. Ces bûchées vont permettre une répartition des eaux sur toute la surface du filtre. L'infiltration de cette nappe d'eau va permettre de chasser une partie de l'air appauvri en oxygène contenu dans le massif et de le renouveler par convection. Des phénomènes de diffusion depuis la surface ou le fond du filtre via le réseau de drainage connecté à l'atmosphère viennent compléter l'aération du massif. Le volume des bûchées et la densité du réseau d'aération-drainage sont les paramètres clés de la conception qui détermineront les capacités d'aération de l'ouvrage.

Le biofilm se développe dans l'espace interstitiel entre les différents grains composant le massif. Lorsque les conditions sont propices, sa croissance est continue et conduit au colmatage du filtre en profondeur. Comme pour la gestion des dépôts superficiels, les périodes de repos sont indispensables pour la régulation de la matière organique à l'intérieur du filtre.

Les quarante premiers centimètres du filtre (ainsi que la couche de boues) sont le siège du traitement de la plus grande partie de la matière carbonée apportée sur le système. Une partie de la charge azotée est également oxydée. Du phosphore est consommé pour le métabolisme bactérien dans la proportion de 1 à 2 % de la masse de DBO₅ consommée.

1.3.3 Traitement de l'azote, filtration et épaisseur du massif filtrant

Compte tenu de la plus grande amplitude de répartition des bactéries autotrophes sur la profondeur, il est possible de faire varier la hauteur de la couche filtrante entre 30 et 80 cm suivant les objectifs de nitrification. Au-delà de 60 cm, il est préconisé de mettre un réseau d'aération intermédiaire, au milieu de la couche, qui assurera l'aération par diffusion au milieu du filtre.

La mise en place d'un fond saturé (partie 1.2.2 p. 13) va permettre de maximiser le traitement de l'azote global en faisant de la dénitrification, pour un surcoût modeste. Il s'agit d'augmenter la hauteur de la couche drainante de manière à pouvoir installer une zone saturée à l'aide d'un coude qui permettra la mise en charge du fond du filtre (Figure 7). Les conditions anaérobies nécessaires à la dénitrification vont s'installer dans la partie saturée. C'est alors l'absence de carbone disponible qui peut limiter la dénitrification.

En fonction des niveaux de rejet, plusieurs configurations de filtres sont possibles. La hauteur de la couche filtrante va permettre de pousser plus ou moins la **nitrification** et, dans une moindre mesure, la rétention des MES. La mise en place d'une zone saturée va permettre la **dénitrification** des formes oxydées de l'azote, ainsi que la **fiabilisation des rejets en MES** (< 25 mg/L) et en DCO. L'enjeu est alors d'adapter les profondeurs des couches non saturées et saturées de manière à optimiser le traitement, notamment de l'azote global.

Quels que soient les choix réalisés, le temps de séjour des effluents dans le système est relativement faible (inférieur à une journée) et ne permet pas le traitement des germes pathogènes (abattement de 2 à 3 unités log maximum).

Autotrophes et hétérotrophes

Cette distinction repose sur la capacité des organismes à produire leur propre matière organique à partir de minéraux ou de gaz (autotrophes, par exemple les bactéries nitrifiantes), ou leur dépendance vis-à-vis du carbone organique (hétérotrophes). Les bactéries nitrifiantes sont des chimio-autotrophes : elles produisent leur matière organique à partir du carbone présent dans l'air mais utilisent l'énergie chimique qu'elles récupèrent de l'oxydation de l'ammonium en nitrate pour synthétiser leurs composés.

1.4 Rôle des végétaux

Prélèvements par les végétaux

En fonction des espèces, on retrouve dans les tissus des végétaux entre 20 et 200 g d'azote par mètre carré et par an et entre 3 et 15 g pour le phosphore. Un EH correspond à la production quotidienne de 15 g d'azote Kjeldahl et 2,5 g de phosphore total.

Avec un dimensionnement à 0,8 m²/EH, la participation directe des végétaux au traitement via leur métabolisme se limite donc au maximum à 2,9 % pour l'azote et 1,3 % pour le phosphore.

Volontairement, le rôle des végétaux a été séparé des processus épuratoires. En effet, les végétaux permettent de maintenir les conditions nécessaires aux processus épuratoires, sans qu'ils participent directement à ceux-ci dans les systèmes décrits ici.

Le principal rôle des végétaux sur les filtres plantés à écoulement vertical alimentés avec des eaux usées brutes est une action mécanique qui empêche le colmatage du dépôt organique à la surface des filtres. Sous l'action du vent, les tiges des plantes vont ménager des anneaux dans la couche de boues (Figure 3 p. 11). Ces anneaux vont permettre l'infiltration des eaux usées et les échanges gazeux entre l'atmosphère et l'intérieur du massif filtrant. La croissance homogène des tiges sur toute la surface des filtres (l'inverse d'un développement en touffes) et une forte densité de tiges sont un gage pour assurer des transferts de gaz optima pour maintenir les capacités épuratoires des filtres.

La partie racinaire des plantes sécrète des composés organiques (exsudats racinaires*) et de faibles quantités d'oxygène. À la surface des racines se développe une flore bactérienne plus diverse et plus dense du reste du massif. Dans les systèmes saturés (filtres à écoulement horizontal), ces bactéries jouent un rôle non négligeable dans le traitement des effluents (Gagnon, 2007).

Les plantes participent à la biodiversité microbienne à l'intérieur du filtre mais dans le cas des filtres à écoulement vertical, l'impact sur le traitement est négligeable.

Le traitement des eaux usées par les FPV décrits ici est donc le fait de la biomasse microbienne contenue dans le massif et non celui des végétaux dont les prélèvements à des fins métaboliques sont négligeables. Le terme commercial de phytoépuration est dans ce cas-là largement abusif.

1.5 Performances épuratoires des FPV en zone tropicale

Les projets engagés dans les DOM, avec le soutien de l'AFB, ont permis de suivre sept stations (Tableau 1). Une centaine de bilans 24 heures avec échantillonnages proportionnels au débit ont été réalisés.

Tableau 1. Présentation des différentes stations pilotes dans la zone tropicale

Nom	Département	Capacité	Filière	Mise en service	Nombre de bilans	Taux de charge moyen (% charge nominale)	
						Organique	Hydraulique
Hachenoua	Mayotte	110 EH	1 étage : 2 FPV NS couche filtrante de 80 cm	Avril 2006	16	53 %	65 %
Bois d'Opale 1	Guyane	300 EH	1 étage : 2 FPV NS 0 et 100 % de recirculation	Mai 2010	9	33 %	139 %
Bois d'Opale 2	Guyane	480 EH	1 étage : 2 FPV NS 100 % de recirculation	Mars 2012	13	29 %	169 %
Mansarde Rancée	Martinique	1 000 EH	1er étage : 2 x 3 FPV NS/S 2e étage : 2 x 2 FPV NS	Janvier 2014	3	10 %	16 %
Taupinière	Martinique	900 EH	1er étage : 2x2 FPV NS/S 2e étage : LB faible charge	Novembre 2014	31	84 %	98 %
Les Mangles	Guadeloupe	120 EH	1 étage : 2 FPV NS/S	Octobre 2015	17	4 %	15 %
Champ d'Ylang 2	Mayotte	190 EH	1 étage : 2 FPV NS Couche filtrante de 30 cm	Novembre 2015	7	81 %	105 %

NS : non saturé ; NS/S : non saturé/saturé ; LB : lit bactérien.

Les taux de charge sont calculés pour des charges appliquées de 350 g DCO/m²/j et une lame d'eau de 0,37 m/j, ce qui correspond à un ratio de dimensionnement de 0,8 m²/EH

* Les termes signalés par un astérisque * sont définis dans le glossaire en fin d'ouvrage.

Ces stations ont été dimensionnées avec un ratio de 0,8 m²/EH, ce qui correspond à une charge appliquée de 350 g DCO/m²/j et une lame d'eau de 0,37m/j sur le filtre en fonctionnement. Les taux de charge organique moyens sont parfois faibles, mais généralement les charges hydrauliques sont élevées, voire très élevées. Les conclusions tirées de l'étude de ce panel de stations seront représentatives d'un niveau de charge normal.

Dans un premier temps, les caractéristiques des eaux usées brutes seront décrites au regard de ce qui a été observé en métropole pour les petites collectivités en milieu rural. Par la suite, étant donné le déséquilibre observé entre les charges organiques et hydrauliques reçues par les stations, la question du temps de pluie et de ses conséquences pour les filtres sera développée. Enfin, les performances des FPV seront présentées à deux niveaux : par procédés (filtre vertical non saturé et filtre vertical non saturé/saturé), puis au niveau des filières de traitement dans leur ensemble à partir des différentes configurations de FPV suivies dans les DOM.

1.5.1 Caractéristiques des eaux usées domestiques des DOM, prise en compte de l'impact des temps de pluie

L'ensemble des résultats des analyses d'eaux brutes des DOM a été synthétisé dans le Tableau 2. La qualité des effluents à l'entrée des stations est très variable, ce qui est une caractéristique de l'assainissement des petites collectivités. Par temps sec, les effluents sont un peu plus concentrés que ce qui a pu être observé en zone rurale métropolitaine (Mercoiret, 2010). Ils sont en revanche plus dilués par temps pluvieux. Dans les deux cas, les eaux usées domestiques brutes observées dans les DOM restent dans la gamme des standards métropolitains, et peuvent être traités sans problèmes par les FPV.

Le tableau confirme que le temps de pluie entraîne une dilution très importante des effluents à traiter. On observe un facteur de dilution de 2 pour l'azote et le phosphore, il n'est plus que de 1,5 pour le carbone et de 1,2 pour les MES. Le fait que la dilution lors

Tableau 2. Présentation des caractéristiques des eaux usées brutes des DOM par temps sec et temps de pluie et comparaison avec les données temps sec des petites collectivités rurales métropolitaines (Mercoiret, 2010)

		DBO ₅ (gO ₂ /l)	DCO (gO ₂ /l)	MES (g/l)	NTK (gN/l)	PT (mgP/L)	Ratio charge hydraulique temps pluie/sec
Temps sec (n = 73)	Max	680	1 394	700	130	23,4	
	Moyenne	319	674	281	83	10,7	
	Min	32	92	28	33	2,7	
	ET	195	340	175	25	4,0	
Temps pluie (n = 15)	Max	580	1 051	519	87	11,2	4,4
	Moyenne	209	449	223	40	5,7	2,8
	Min	30	109	49	7	1,7	1,9
	ET	178	307	148	27	2,8	1,2
Petites coll. métro. (n = 10 275)	Max	1 230	2 930	2 100	223	39,2	
	Moyenne	265	646	288	67	9,4	
	Min	5	30	2	1	0,2	
	ET	171	395	226	35	5,3	

d'épisodes pluvieux touche de manière asymétrique les différents polluants est classique et s'explique par le fait qu'au cours du ruissellement, les eaux de pluies se chargent principalement de matières minérales et carbonées (hydrocarbures sur les routes, etc.). Le ratio temps pluie/temps sec montre que, lors des épisodes pluvieux, la charge hydraulique à traiter fait plus que doubler.

Quelles sont la fréquence et l'ampleur de ces surcharges hydrauliques ? Comment se comportent les filtres lors de ces épisodes ?

Charge hydraulique nominale appliquée sur le filtre en fonctionnement

Elle s'exprime en hauteur d'eau (m), puisqu'elle correspond à un volume (m³) appliqué sur une surface (m²). Le ratio de dimensionnement des FPV est de 0,8 m²/EH. Comme les deux filtres fonctionnent en alternance, la charge appliquée ne s'exerce en réalité que sur un des deux filtres, soit 0,4 m²/EH.

Pour la charge hydraulique, cela correspond à :

$$\frac{0,15 \text{ m}^3/\text{j}}{0,4 \text{ m}^2/\text{EH}} = 0,37 \text{ m/j}$$

Pour mémoire, on considère que le volume d'eaux usées produit par un EH est de 150 L/j, soit 0,15 m³.

En condition de charge « normale », seuls quelques épisodes pluvieux dans l'année (2 %) sont susceptibles d'avoir un impact sur le fonctionnement des filtres au niveau de l'azote. En conditions particulières (surcharge organique, recirculation), cette proportion peut monter à 15 % (figure 12). Ces proportions sont à moduler en fonction de la qualité du réseau et de la pluviométrie locale.

Pour aller plus loin

La Figure 12 a été réalisée à partir de l'enregistrement quotidien des charges hydrauliques qu'a reçues la station de Taupinière (Martinique) entre le 1er janvier 2015 et le 31 mai 2017. Les filtres sont exploités sans recirculation et le réseau à l'amont de la station est neuf. Ce suivi permet d'étudier les charges hydrauliques reçues par la station, ainsi que les fréquences et l'ampleur des surcharges provoquées par les épisodes pluvieux.

Au démarrage de l'étude, le taux de charge organique reçu par la station était faible (autour de 30 % de la charge organique nominale), par la suite il a augmenté. À ce moment-là, un des filtres a été partitionné en deux et seule une moitié a été gardée en fonctionnement. De cette manière, il a été possible d'étudier le fonctionnement de la station à faible charge (32 %, phase de démarrage), en conditions normales (85 % de la charge organique nominale, sur le filtre entier) et en forte surcharge (164 % de la charge organique, sur le filtre partitionné).

À partir de l'enregistrement des débits et de la surface des filtres en fonctionnement, la lame d'eau quotidienne appliquée a été calculée. Ces lames d'eau sont classées par ordre croissant. Toutes ayant la même fréquence d'occurrence, la courbe de fréquence cumulée permet de représenter la dispersion des lames d'eau appliquées et de visualiser les fréquences de dépassement de valeurs seuils. Prost-Boucle et Molle (2012) considèrent que lorsque la lame d'eau quotidienne dépasse 75 cm, les processus de nitrification commencent à diminuer. Les courbes montrent que pour une charge normale, 15 % des événements sont au-delà de la charge hydraulique nominale et 2 % d'entre eux sont au-delà de la limite à partir de laquelle la nitrification peut être impactée. En cas de surcharge organique, les fréquences sont beaucoup plus élevées : 95 % des événements sont au-delà de la charge hydraulique nominale et 15 % d'entre eux sont au-delà de la limite d'impact sur la nitrification. Un taux de recirculation de 100 % correspond à un doublement de la charge appliquée sur le filtre en fonctionnement donc, en termes d'hydraulique, à ce qui a été observé sur le filtre en surcharge organique.

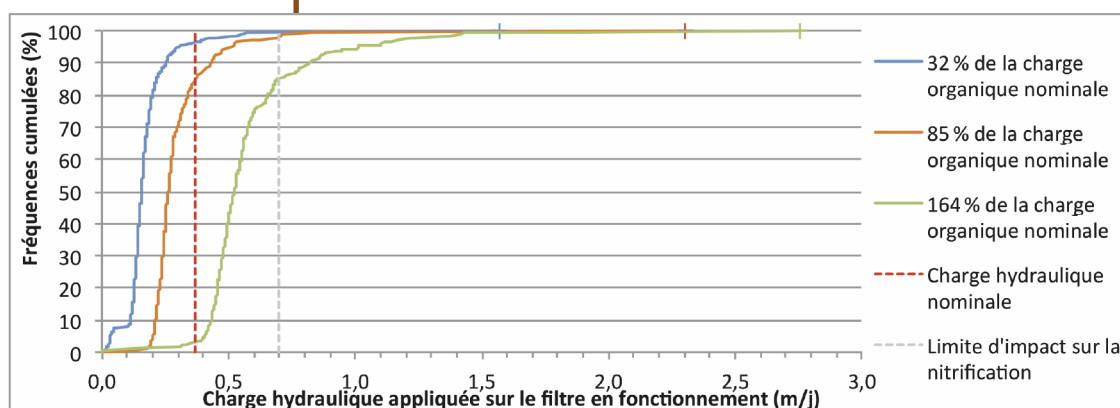


Figure 12. Distribution des charges hydrauliques appliquées sur les filtres de la station de Taupinière (Martinique) entre le 1/01/2015 et le 31/05/2017. Les barres correspondent aux valeurs maximales enregistrées pour chaque série.

Le 28 septembre 2016, la Martinique a été traversée par la tempête tropicale Matthew. Les données enregistrées par la station de Taupinière ont permis de faire le point sur le fonctionnement d'un filtre en conditions extrêmes.

Entre le 28 à 13 h et le 29 à 3 h, 88,6 mm de pluie ont été enregistrés par le pluviomètre de la station. Une lame d'eau de 2,39 m a été appliquée sur le filtre en fonctionnement ce jour-là, soit plus de 7 fois la charge nominale. En sortie de filtre, en temps normal, les eaux traitées sont pompées vers le lit bactérien. Le débit des pompes n'a pas été suffisant lors du passage de Matthew et les filtres sont montés en charge. La hauteur d'eau maximale dans le poste a atteint 3 m, ce qui correspond à une vingtaine de centimètres d'eau à la surface des filtres, comme on peut le voir sur la Figure 13. La station s'est ensuite peu à peu vidée pour revenir à un état normal 24 heures après la fin de la tempête.

Les seuls dommages qui ont été constatés sur la station concernent les végétaux (Figure 14). Les FPV ont donc la capacité d'absorber les surcharges hydrauliques générées par les tempêtes tropicales. Pour éviter une mise en charge des filtres et faciliter le retour à un fonctionnement normal dès la fin des pluies, il est conseillé de mettre en place un by-pass en sortie de filtre si un relevage des eaux est nécessaire avant un traitement complémentaire.



Figure 13. Mise en charge des filtres de la station de Taupinière au cours de la tempête Matthew. Ce sont les filtres de la 2^e ligne de la station qui ne sont pas encore en service et donc ne sont pas plantés, faute de charge suffisante.



Figure 14. Végétaux plantés sur les filtres en service de la station de Taupinière après le passage de la tempête Matthew. À gauche au premier plan, les *Cyperus alternifolius* avaient été fauchés peu de temps auparavant et ont donc bien résisté. Les *Heliconia psittacorum* à l'arrière-plan ont souffert en particulier des vents, mais ont pu repartir. À droite, les *Costus spiralis* étaient déjà dans un mauvais état avant la tempête, et n'ont pu repartir suite à cette dernière.

L'évaluation des eaux brutes arrivant sur les FPV des DOM montre que :

- les eaux usées brutes mesurées dans les DOM sont dans la gamme des concentrations standard observées en zone rurale métropolitaine ;
- lors d'épisodes pluvieux, les débits d'eau à traiter sont en moyenne multipliés par un facteur supérieur à 2 ;
- pour des ouvrages correctement chargés (> 70 % de la charge nominale), il n'est pas rare que la charge hydraulique appliquée soit proche des limites à partir desquelles les processus de nitrification pourraient être impactés ;
- enfin, les FPV supportent assez bien le passage de tempêtes tropicales malgré des lames d'eau appliquées supérieures à 7 fois la charge nominale.

1.5.2 Performances des différents procédés de filtres plantés en climat tropical

La partie 1.2 présente les différentes configurations de FPV. Ces dernières recouvrent en fait deux catégories de procédés :

- les filtres plantés à écoulement **vertical entièrement non saturés (FPVv NS)**, dont les processus de traitement sont entièrement aérobies ;

- les filtres plantés à écoulement **vertical non saturé/saturé (FPVv NS/S)** qui, en plus des processus aérobies, ont également des processus de traitement anaérobies grâce à leur zone anoxique. Cette distinction entre les procédés de traitement est conservée tout au long de la présentation des performances. Ces dernières sont discutées dans un premier temps à l'échelle des procédés, donc au niveau du filtre, avant d'être étendues au point suivant au niveau de la filière (à l'échelle de la station).

Le Tableau 3 présente les concentrations des eaux brutes et traitées, ainsi que les abattements correspondants pour les principaux paramètres de qualité des eaux, et ce pour les deux procédés de FPV. La Figure 15 reprend l'ensemble des valeurs des bilans et présente, par procédé, la dispersion des concentrations mesurées au cours des bilans, sous la forme de percentiles cumulés.

Tableau 3. Synthèse des analyses réalisées sur les échantillons entrée et sortie filtre (1^{er} étage uniquement)

	FPV NS (n = 45)											
	Eaux brutes (mg/L)				Eaux traitées (mg/L)				Abattement (%)			
	Max	Moy	Min	ET	Max	Moy	Min	ET	Max	Moy	Min	ET
DBO₅	560	245	30	163	90	17	3	16	98 %	90 %	74 %	6 %
DCO	1240	585	109	296	184	75	23	32	96 %	83 %	50 %	10 %
DCOf	671	244	36	135	114	50	15	22	93 %	75 %	45 %	12 %
MES	648	263	49	165	81	28	3	20	99 %	86 %	35 %	12 %
NTK	123	65	7	32	45	16	2	11	98 %	68 %	12 %	23 %
NH₄	120	52	6	31	35	13	0	9	100 %	68 %	4 %	26 %
NO₃	1,5	0,7	0,45	0,34	66	21	0,1	16				
NT	124	66	7	33	74	36	11	17	75 %	42 %	2 %	18 %
PT	23,4	10,2	1,7	4,8	11,3	4,9	1,3	2	91 %	46 %	2 %	26 %

	FPV NS/S (n = 48)											
	Eaux brutes (mg/L)				Eaux traitées (mg/L)				Abattement (%)			
	Max	Moy	Min	ET	Max	Moy	Min	ET	Max	Moy	Min	ET
DBO₅	680	344	32	205	60	12	2	10	98 %	93 %	68 %	5 %
DCO	1394	696	92	371	196	85	15	46	94 %	85 %	66 %	7 %
DCOf	558	241	74	116	97	59	9	28	91 %	72 %	12 %	15 %
MES	700	282	28	175	70	15	3	12	98 %	93 %	64 %	5 %
NTK	130	85	31	25	51	18	3	14	96 %	79 %	39 %	15 %
NH₄	110	64	21	21	44	16	2	13	97 %	76 %	24 %	19 %
NO₃	9,32	0,71	0,01	1,28	75	13	0	17,3				
NT	131	85	31	25	66	29	13	14	86 %	62 %	19 %	16 %
PT	20,7	9,3	2,7	3,6	11	5,6	0,7	3	88 %	42 %	-4 %	26 %

n : nombre de données ; *Max* : valeur maximale ; *Min* : valeur minimale ; *Moy* : moyenne ; *ET* : écart type.

Malgré l'importante variabilité de la qualité des effluents à l'entrée des stations, l'abattement est conséquent et stable pour la pollution carbonée (83 % pour les systèmes NS et 85 % pour les systèmes NS/S), les MES (86 % et 93 %) et l'azote organique (68 % et 79 %).

Les différences entre les procédés sont nettes : l'ajout d'un fond saturé permet un léger gain sur le carbone, mais fiabilise les performances pour les MES et les améliore fortement sur l'azote (+20 % sur NT).

Durant les campagnes de mesures, il n'a été observé aucun dépassement des niveaux de rejet (performances minimales de l'arrêté du 21 juillet 2015 ou arrêté préfectoral spécifique). À la sortie du filtre en fonctionnement, les rejets respectent également les concentrations rédhibitoires² pour les ouvrages de plus de 2 000 EH, à l'exception de la DBO₅ pour trois bi-lans à très forte charge à Taupinière (avant le second étage).

2- Concentrations rédhibitoires au sens de l'arrêté du 21 juillet 2015. Les exigences réglementaires sont rappelées au paragraphe 2.1.

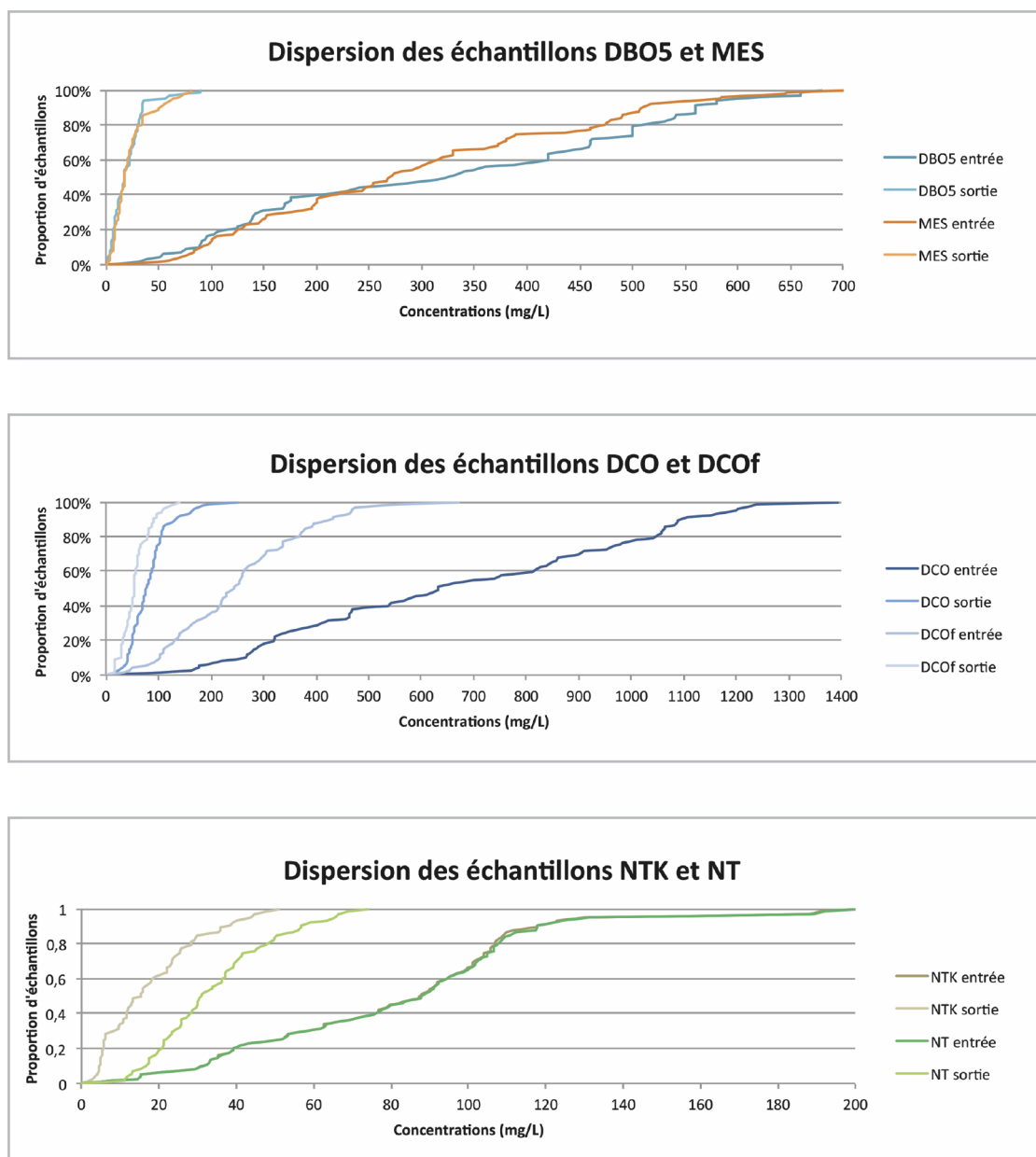


Figure 15. Dispersion des valeurs des échantillons en fonction des concentrations.

La réduction du ratio de dimensionnement de la filière entre la métropole et la zone tropicale (partie 1.1 p. 12) pose la question des limites du système : ce gain de compacité ne s'est-il pas fait au détriment de ses performances ou de sa robustesse ?

Les graphiques de la Figure 16 présentent les charges traitées en fonction des charges appliquées sur le filtre en fonctionnement, ce qui permet d'évaluer la qualité du traitement en fonction des charges appliquées.

Pour la DCO et les MES, les charges obtenues jusqu'à présent ne permettent pas de voir les limites des filtres puisque les performances restent stables, même au-delà de la charge nominale. Pour le NTK, en revanche, on voit que les performances commencent à se dégrader à partir de 30 g/m²/j. Jusqu'à 50 g/m²/j, l'abattement semble supérieur à 60 % mais il pourrait devenir inférieur au-delà.

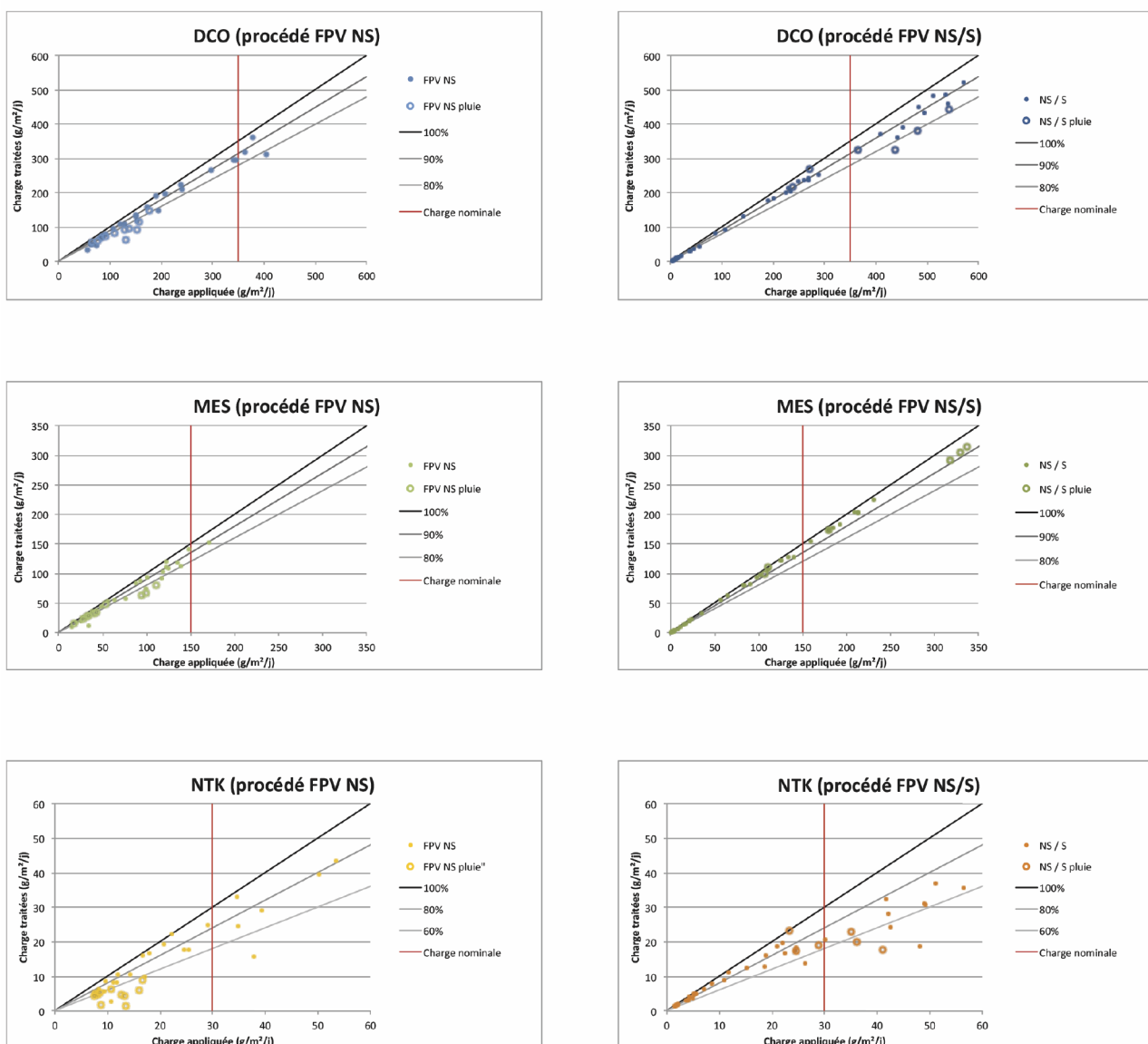


Figure 16. Charges traitées en fonction des charges appliquées pour les paramètres DCO, MES et NTK pour les deux types de procédés. Les droites grisées correspondent à des valeurs guides pour les rendements épuratoires.

Ces graphiques permettent également d'évaluer l'impact des temps de pluie et des surcharges hydrauliques associées : quelle que soit la charge appliquée, les performances les moins bonnes sont observées par temps de pluie. Cela peut s'expliquer par deux raisons principalement. Tout d'abord, comme le montre le Tableau 2, lors d'épisodes pluvieux, les effluents sont dilués. Il n'est pas possible de maintenir un traitement élevé avec des effluents dilués : cela impliquerait de descendre à des concentrations très basses, au-delà des limites biologiques ou chimiques. Par ailleurs, les surcharges hydrauliques entraînent à la fois une diminution des échanges gazeux entre le filtre et l'atmosphère (flaquage* long) et une réduction du temps de séjour des eaux usées dans le système. Les surcharges hydrauliques rapprochent le système de ses limites.

On n'observe pas de différence notable entre les procédés sur ces graphiques. Les charges reçues par les stations à écoulement vertical non saturé sont plus faibles et restent inférieures à la charge nominale. Dans cette zone de confort, les performances sont très bonnes quel que soit le procédé considéré. C'est sans doute au-delà que des différences auraient pu être observées. D'autre part, en ce qui concerne le NTK, les performances des stations à écoulement vertical non saturé sont hétérogènes. Le nombre de systèmes étudiés étant faible, toute conclusion paraît hasardeuse.

Les règles de dimensionnement de la filière tropicale permettent de garantir un niveau de traitement stable, même en cas de surcharge organique du système (jusqu'à 165 % de la charge nominale à Taupinière). Il aurait donc été possible de réduire encore la surface des filtres. Mais lors d'épisodes pluvieux, comme pour les autres filières de traitement, les performances des FPV en rendement épuratoires diminuent puisque les concentrations sont plus faibles. Pour garantir des performances élevées même lors de surcharge hydraulique, il a été choisi de ne pas aller en deçà de 0,8 m²/EH.

1.5.3. Performances des FPV à l'échelle de la filière

Après avoir décrit les performances de chacun des procédés, il est intéressant d'évaluer les performances des filières de traitement dans leur globalité, c'est-à-dire pour les différentes variantes de FPV ou dans le cas d'association de procédés.

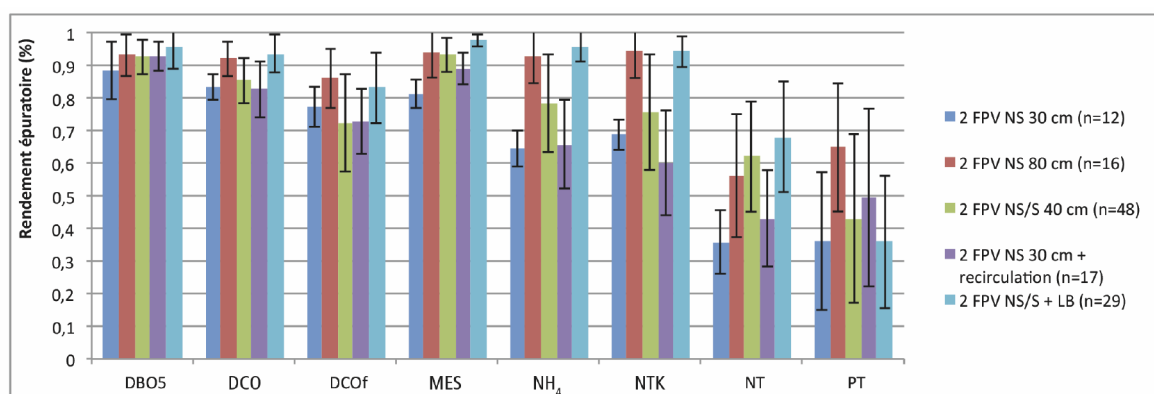


Figure 17. Comparaison des performances des différentes configurations des filtres plantés de végétaux (FPV). Les barres noires verticales représentent l'incertitude (écarts types). NS : non-saturé ; NS/S non-saturé/saturé ; LB : lit bactérien.

Traitement du phosphore

Aucune de ces configurations n'a été conçue pour le traitement du phosphore. Cependant, la phase particulaire se retrouvera piégée dans la couche de boues, le traitement de la partie dissoute se limitant au métabolisme bactérien (approximativement 2 % de la charge de DBO₅ abattue) et à des phénomènes d'adsorption sur les matériaux composant le massif. Les capacités d'adsorption des graviers ne se régénèrent pas et diminuent avec le temps. Les performances sur le phosphore peuvent être importantes dans les premiers mois (voire années) de vie de la station (> 70 %) pour diminuer et se stabiliser par la suite autour de 30-40 %.

La Figure 17 présente l'abattement des principaux paramètres de qualité des eaux pour les différentes configurations étudiées dans les DOM. La configuration à 2 étages de filtres verticaux en série (2FPV NS/S + 2FPV NS à Mansarde Rancée) n'a pas été intégrée en raison d'un manque de représentativité des données dû au taux de charge trop faible de la station (10 % en moyenne).

Le traitement de la pollution carbonée est très bon quelle que soit la configuration retenue (abattement supérieur à 80 %).

Les MES sont, en revanche, moins retenues sur les filtres verticaux non saturés avec une faible hauteur de couche filtrante que sur les autres. Avec des rendements minimaux au-delà de 75 %, les performances minimales de l'arrêté de 2015 sont solidement garanties. La mise en place d'un fond saturé ou d'une hauteur de matériaux de filtration plus importante donne des performances très stables, généralement supérieures à 90 %.

En ce qui concerne le traitement de l'azote, la nitrification est limitée à 50-60 % avec les configurations les plus simples. L'augmentation de la hauteur de la couche filtrante et la mise en place d'un drain d'aération intermédiaire améliorent très significativement la nitrification. Le fond saturé permet l'installation de processus anaérobies et la dénitrification et l'abattement est plus poussé pour l'azote global.

Ces résultats sont à relativiser compte tenu du faible nombre de stations ou de bilans pour certaines configurations (une seule station est équipée d'une couche filtrante de 80 cm).

Les configurations à deux étages permettent de tenir des niveaux de rejet poussés : 90 % d'abattement sur DBO₅, DCO, MES et NTK ou 20 mg/L DBO₅, 125 mg/L DCO, 30 mg/L MES et 8 mg/L NTK. Les performances sur le second étage sont moindres que sur le premier étage, mais restent indispensables pour atteindre des objectifs exigeants.

Pour aller plus loin

Par rapport à ce qui a été observé en métropole, les performances obtenues par un FPV NS avec 30 cm de couche filtrante sont comparables à celles des premiers étages de FPR toutes hauteurs de filtration confondues (Molle, *et al.*, 2005, Morvannou, *et al.*, 2015). La configuration à 80 cm montre des abattements équivalents, voire supérieurs pour le NTK, aux filières métropolitaines à deux étages. Enfin, la configuration à un étage NS/S atteint des performances comparables pour le carbone et les MES à ce qui a été observé en métropole, et des niveaux légèrement supérieurs pour NTK et NT (Morvannou, *et al.*, 2017).

Conception : objectifs de traitement, charges à traiter et stratégie

2

Lors de la conception d'une station de traitement des eaux usées, la première préoccupation est de sélectionner le point de rejet de la station, ce qui déterminera la qualité à atteindre pour les eaux traitées. Les niveaux de rejet à atteindre orienteront le choix de la filière de traitement à mettre en place. Un tableau décisionnel est proposé ci-après pour accompagner le choix entre les différentes variantes de FPV. La question de la population à raccorder et le rythme de montée en charge prévu vont conditionner la capacité de traitement de l'ouvrage, son agencement et l'éventuel phasage du projet.

2.1. Niveaux de rejet

2.1.1. Exigences réglementaires

En dehors des exigences complémentaires qui peuvent être imposées par le milieu récepteur, les niveaux de rejet minimaux à atteindre sont fixés par l'arrêté du 21 juillet 2015. Le Tableau 4 reprend l'annexe 3 de l'arrêté présentant les performances minimales des stations de traitement des eaux usées devant traiter une charge brute supérieure ou égale à 1,2 kg/j de DBO₅ (ce qui correspond à une charge de 20 EH).

Les performances sont à atteindre en concentration ou en rendement. Cependant, au-delà de certaines concentrations, dites rédhibitoires, le bilan est déclaré non conforme quels que soient les rendements associés. En cas de bilan non conforme, un certain nombre d'autres campagnes doivent être réalisées (et validées) dans l'année pour lever la non-conformité.

Tableau 4. Performances minimales de traitement attendues pour les paramètres DBO₅, DCO et MES définies par l'arrêté du 21 juillet 2015

Paramètre	CHARGE BRUTE de pollution organique reçue par la station en kg/j de DBO ₅	CONCENTRATION maximale à respecter, moyenne journalière	RENDEMENT MINIMUM à atteindre, moyenne journalière	CONCENTRATION rédhibitoire, moyenne journalière
DBO ₅	< 120 ≥ 120	35 mg (O ₂)/L 25 mg (O ₂)/L	60 % 80 %	70 mg (O ₂)/L 50 mg (O ₂)/L
DCO	< 120 ≥ 120	200 mg (O ₂)/L 125 mg (O ₂)/L	60 % 75 %	400 mg (O ₂)/L 250 mg (O ₂)/L
MES	< 120 ≥ 120	/ 35 mg/L	50 % 90 %	85 mg/L 85 mg/L

La réglementation ne prévoit pas d'obligation pour le traitement de l'azote et du phosphore pour les stations de capacité inférieure à 10 000 EH (600 kg/j DBO₅), quand bien même celles-ci se trouveraient en zone sensible. En fonction du devenir des eaux traitées, les services de police de l'eau (SPE) ont la possibilité de définir des niveaux de rejet plus contraignants dans l'arrêté préfectoral d'autorisation de la station de traitement.

2.1.2. Le milieu récepteur

Le point de rejet des eaux traitées dans le milieu naturel (masse d'eau superficielle, ravine, émissaire en mer, infiltration...) va être le point de départ de la démarche du SPE pour définir les niveaux de rejet à atteindre.

La question est très sensible puisque les performances épuratoires que doit garantir la station découlent des niveaux de rejet. Ce sont toujours les derniers pourcentages d'abattement ou mg/L qui sont les plus difficiles – et les plus chers – à atteindre. Des niveaux de rejet très exigeants ont des répercussions directes sur le coût du projet.

En cas d'objectifs de traitement très ambitieux, il peut être préférable d'explorer des alternatives pour modifier l'implantation de la station et ainsi trouver un milieu récepteur moins sensible de manière à avoir des niveaux de rejet moins contraignants. Dans certains cas, il est même plus intéressant de revoir le zonage d'assainissement de la commune pour requalifier certaines zones en assainissement non collectif (ANC). Pour plus d'informations, on conseillera de se référer à la note sur la définition des niveaux de rejet réalisée par un groupe de travail MEDDE-Epnac (2015).

Certains objectifs peuvent avoir des répercussions sur d'autres paramètres. Dans les DOM, compte tenu de la proximité des plages et de l'importance du secteur touristique, on retrouve fréquemment des objectifs de traitement complémentaire pour les germes pathogènes. À l'exception du lagunage naturel, l'abattement des pathogènes nécessite fréquemment de faire appel à un traitement tertiaire. C'est généralement un traitement par UV qui est mis en place. Pour qu'il soit efficace, il faut que les concentrations en MES des effluents soient inférieures à 25 mg/L. Pour garantir en permanence des niveaux de rejet aussi faibles en MES, la filière doit être adaptée (Tableau 5 page suivante). Pour le traitement des pathogènes, le surcoût n'est donc pas seulement lié au module UV mais aussi à l'abattement plus poussé des MES.

2.2. Choix de la filière à mettre en œuvre

Le Tableau 5 synthétise les informations qui vont orienter le choix entre les différentes variantes de FPV en fonction des contraintes du projet. Il présente essentiellement les variantes qui ont été évaluées dans les DOM jusqu'à présent.

La configuration minimale est un seul étage de deux filtres en parallèle avec 30 cm de couche filtrante. Elle permet d'atteindre le minimum de l'arrêté de 2015 pour les stations de moins de 2 000 EH. Elle n'est pas la plus adaptée en cas d'activité intermittente (gîte, école...), où l'absence d'effluents à traiter sera préjudiciable aux plantes. Elle ne permet pas non plus le traitement des germes pathogènes par module UV, étant donné qu'elle ne peut pas garantir des rejets de concentration inférieure à 25 mg/L de MES en permanence.

Tableau 5. Synthèse des informations présidant au choix des variantes de filtre planté de végétaux (FPV) à mettre en place

Variantes de FPV	Autonomie électrique (hors contraintes topographiques)	Réseau unitaire	Activité intermittente	Emprise au sol des ouvrages de traitement	Performances de traitement garanties : abattement % (concentrations limites mg/L)				Traitement germes pathogènes (module UV)
					DCO	MES	NTK	NT	
2 FPV NS couche filtrante 30 cm	✓	✓	✗	0,8 m²/EH	75 % (125 mg/L)	80 % (50 mg/L)	60 % (40 mg/L)	20 % (60 mg/L)	✗
2 FPV NS couche filtrante 30 cm + recirculation	✗	✓ (lame d'eau quotidienne < 70 cm)	✓ (attention aux consommations électriques)	0,8 m²/EH	75 % (125 mg/L)	85 % (30mg/L)	60 % (40 mg/L)	20 % (60 mg/L)	✗
2 FPV NS/S couche filtrante 30 cm	✓	✓	✓	0,8 m²/EH	85 % (125 mg/L)	90 % (25 mg/L)	60 % (40 mg/L)	50 % (50 mg/L)	✓
2 FPV NS couche filtrante 80 cm	✓	✓	✓ possible si recirculation	0,8 m²/EH	90 % (100 mg/L)	90% (25 mg/L)	80 % (15 mg/L)	20 % (60 mg/L)	✓
2 FPV NS/S + 2 FPVv	✓	✓	✓ possible si recirculation (stress hydrique du deuxième étage)	1,6 m²/EH	90 % (75 mg/L)	95 % (15 mg/L)	90 % (6 mg/L)	70 % (35 mg/L)	✓
2 FPV NS/S + LB	✗	✓	✓	0,9 m²/EH	90 % (75 mg/L)	95 % (15 mg/L)	90 % (6 mg/L)	70 % (35 mg/L)	✓
2 FPV NS + FPVh	✓	✓	✓	1,8 m²/EH	85 % (125 mg/L)	90 % (25 mg/L)	70 % (20 mg/L)	70 % (35 mg/L)	✓

✓ = possible ✗ = pas possible

L'ajout d'une boucle de recirculation permet de fiabiliser les rejets en MES et ainsi d'atteindre le minimum de l'arrêté de 2015 pour les stations de plus de 2 000 EH (< 35 mg MES/L) mais nécessite la pose d'un poste de relevage. Si le réseau est unitaire, le taux de recirculation doit pouvoir être ajusté facilement en cas d'averse de manière à ne pas amplifier la surcharge hydraulique liée aux temps de pluie.

En revanche, la boucle de recirculation garantit la présence d'eau dans la station même en cas d'activité intermittente. Le taux de recirculation doit être bien ajusté : durant ces périodes d'inactivité, les consommations électriques ne correspondent plus au traitement des effluents mais à l'arrosage des plantes sur les filtres. Même améliorées, les performances sur les MES ne permettent pas d'assurer le bon fonctionnement d'un module UV.

La mise en place d'un fond saturé va permettre de franchir la limite de 25 mg/L de MES et ainsi d'assurer la désinfection via un module UV. La zone anaérobie élimine les nitrates et améliore les rejets du point de vue de l'azote total. En l'absence d'effluents, les plantes récupèrent l'eau de la zone saturée, la station peut donc être complètement à l'arrêt.

L'augmentation de hauteur de la couche filtrante à 80 cm avec la mise en place d'un drain intermédiaire à 40 cm permet d'atteindre 90 % d'abattement et 100 mg/L en DCO, 85 % et 15 mg/L en NTK et de franchir la barre des 25 mg/L de MES.

Un deuxième étage de traitement peut être nécessaire pour garantir des niveaux de rejet très faibles. Là encore, de multiples configurations sont possibles.

Toutes les configurations n'ont pas pu être testées. Par exemple, placer un fond saturé sous un filtre avec 80 cm de couche filtrante semble prometteur et pourrait permettre d'atteindre d'excellentes performances : 90 % d'abattement en DCO et en MES, 85 % en NTK et 60 % en NT.

Pour aller plus loin

Pour cette dernière configuration (80 cm NS/S), la dénitrification étant consommatrice de carbone, il est toutefois possible que l'abattement très poussé de la charge carbonée par la partie non saturée du filtre entraîne un ratio C/N limitant pour la dénitrification.

2.3. Estimation des charges à traiter

Les charges reçues par les stations sont généralement inférieures à 50 % de la charge nominale aussi bien dans les DOM qu'en métropole. Ce constat a pour cause une mauvaise estimation des charges à traiter ainsi qu'une prévision de croissance démographique de la collectivité surestimée.

L'estimation des charges à traiter est un exercice délicat, y compris dans le cas des projets immobiliers de maîtrise d'ouvrage privée dont le nombre de logements est pourtant parfaitement maîtrisé. Bien souvent, le maître d'ouvrage n'a aucun moyen de connaître la charge puisque le réseau n'est pas encore construit. La durée de vie d'une station étant de 25 ans minimum, l'estimation se base alors sur l'habitat construit et les projections démographiques impressionnantes de l'INSEE : une croissance démographique tous DOM confondus de 34,6 % entre 2011 et 2030 contre 5,1 % pour toute la population française (Richez, 2011). Ces prévisions sont à relativiser puisqu'en 2016, la population de la Martinique s'est contractée de 1 % alors que l'INSEE prévoit pour 2030 une croissance de 7,5 % par rapport à 2011.

Au-delà des projections démographiques, dans le but de fiabiliser les estimations de charges à traiter, il semble intéressant de rappeler la distinction entre habitant et équivalent-habitant, les coefficients correcteurs utilisés pour définir les capacités des ensembles collectifs (école, hôtel...) et, enfin, de revenir sur la possibilité de phasage des projets qu'offrent les FPV.

2.3.1. Définition de l'EH tropical

La capacité de traitement d'une station s'exprime en équivalent-habitant (EH). La directive européenne du 21 mai 1991 définit l'EH comme « la charge organique biodégradable ayant une demande biochimique en oxygène à 5 jours (DBO₅) de 60 grammes d'oxygène par jour ».

La pollution réelle émise par une personne change en fonction du contexte mais se situe plutôt entre 40 et 50 g DBO₅/j. Le guide ERU du MEDDE (Morin, *et al.*, 2013) considère que « dans les petites communes sans activités industrielles raccordées, un habitant produit 40 g de DBO₅/j ». Dans ces conditions, **assimiler l'habitant à l'EH revient en pratique à surdimensionner la station de 50 %**.

Le constat est identique dans les DOM et a amené le Syndicat intercommunal de l'eau et de l'assainissement de Mayotte (SIEAM) à définir l'EH mahorais, 1 EHm = 0,75 EH. S'il a au moins l'avantage de prendre en compte la différence habitant-EH, l'EHm apporte de la confusion en donnant l'impression qu'il y a une différence avérée de charge organique produite entre un Mahorais et un métropolitain.

Mercoiret (2010) a traité les données de plus de 10 000 bilans 24 heures réalisés sur plus de 2 700 stations de moins de 2 000 EH en métropole. Elle a calculé un certain nombre de ratios (ex. : DCO/DBO₅) qui présentent l'avantage d'être représentatifs des eaux usées brutes du milieu rural tout en étant relativement peu dépendants du taux de charge de la station. En appliquant ces ratios à la définition de l'EH, on peut alors définir les charges équivalentes à un EH pour les différents polluants (Tableau 6).

Le même travail est en cours de réalisation à partir de l'ensemble des données d'autosurveillance produites dans les DOM depuis 2012. Notre base de données comporte plus de 9 500 bilans 24 h réalisés sur l'ensemble du parc de stations ultramarin*. Il permet de définir l'EH tropical dans sa globalité et n'est pas forcément représentatif des eaux usées brutes en zone rurale (les effluents industriels des grandes agglomérations sont compris dans l'échantillon).

Il est également pertinent de considérer les modes de vie de certaines communautés ethniques. En Guyane ou à Mayotte notamment, certaines communautés (raccordées au réseau de collecte public) vont procéder, par tradition, aux lessives ou à la cuisine à l'extérieur du domicile, ce qui représente autant d'effluents non collectés. Dans ces cas communautaires très spécifiques, le bureau d'études est encouragé à adapter, selon sa connaissance sociale du terrain, les coefficients qui rapprocheront l'estimation des charges polluantes de la réalité

Tableau 6. Comparaison de l'EH métropolitain et tropical pour les petites collectivités (< 2 000 EH). La valeur entre parenthèses correspond à la valeur calculée, ce sont les valeurs arrondies qui sont retenues (Données métropole d'après Mercoiret 2010)

Paramètre	DBO ₅ (gO ₂ /j)	DCO (gO ₂ /j)	NTK (gN/j)	NH ₄ (gN/j)	PT (gP/j)	MES (g/j)
EH rural métropolitain	60	150 (157,2)	15 (15,5)	11 (11,5)	2,5 (2,1)	75 (72)
EH tropical (toutes tailles)	60	125 (127,5)	15 (13,5)	11 (10,25)	2,5 (1,85)	75 (66,9)

En dehors de la valeur de la DCO pour laquelle la différence entre l'EH métropolitain et tropical est supérieure à 20 %, les écarts sont faibles et pas significativement différents au regard de la dispersion des valeurs de l'échantillon. Ce qui est tout à fait normal : le métabolisme humain est identique partout.

En revanche, les habitudes de consommation peuvent entraîner des variations pour les pollutions d'origine chimique (DCO, PT). L'écart constaté pour la DCO est sans doute sous-estimé du fait que l'évaluation de l'EH tropical s'appuie, en partie, sur des bilans réalisés sur des stations en zone urbaine où la pollution d'origine industrielle, riche en polluants chimiques, est prise en compte. Il semble donc que la population des DOM produise moins de pollution d'origine chimique qu'en zone rurale métropolitaine.

C'est sur les valeurs de ce tableau que l'on s'appuie pour le dimensionnement des ouvrages d'assainissement.

2.3.2. Coefficients correcteurs pour le dimensionnement des ouvrages

La circulaire du 22 mai 1997 relative à l'assainissement non collectif donne des coefficients correcteurs en fonction du type d'installation (Tableau 7). Faute d'étude plus récente, ceux-ci sont toujours d'actualité pour l'estimation des charges de petits ensembles collectifs. Ce sont des valeurs guides qui demandent à être adaptées par le maître d'œuvre en fonction de la réalité du terrain.

Tableau 7. Coefficients correcteurs pour l'évaluation de la capacité des petits ensembles collectifs, d'après la circulaire du 22 mai 1997

Paramètre	Coefficient correcteur
Usager permanent	1
École (pensionnat), caserne ou maison de repos	1
École (demi-pension) ou similaire	0,5
École (externat) ou similaire	0,3
Hôpital, clinique... par lit (comprenant le personnel soignant et d'exploitation)	3
Personnel d'usine (par poste de 8 h)	0,5
Personnel de bureaux, de magasins	0,5
Hôtel-restaurant, pension de famille (par chambre)	2
Hôtel, pension de famille sans restaurant, par chambre	1
Terrain de camping	0,75 à 2
Usagers occasionnels (lieu public)	0,05

D'autres références de ce type sont parfois disponibles auprès des interprofessions pour certaines activités spécifiques.

2.3.3. Phasage des projets dans le temps

Quand de fortes incertitudes pèsent sur l'estimation des charges à traiter (projection démographique, raccordements hypothétiques, démarrage d'une activité touristique), il est possible de découper le projet en plusieurs phases pour ajuster les investissements à l'évolution des besoins.

Les FPV peuvent facilement évoluer (Figure 18) :

- en créant une seconde file*, parallèlement à la première, ce qui nécessite de faire évoluer la capacité de l'ouvrage d'alimentation ou de mettre en place un jeu de vannes automatiques pour l'alimentation des deux files ;
- en ne construisant qu'un des deux filtres prévus initialement et en le partitionnant. La séparation peut être plus ou moins définitive (mur, onduline...), l'important étant que les couches filtrantes des deux moitiés de filtres soient hydrauliquement séparées, pour que les périodes de repos soient strictement respectées. Il faut prévoir également de diviser le système d'alimentation pour mettre en place l'alternance.

Quelle que soit la solution retenue, il est important de prévoir la réserve foncière pour l'extension.

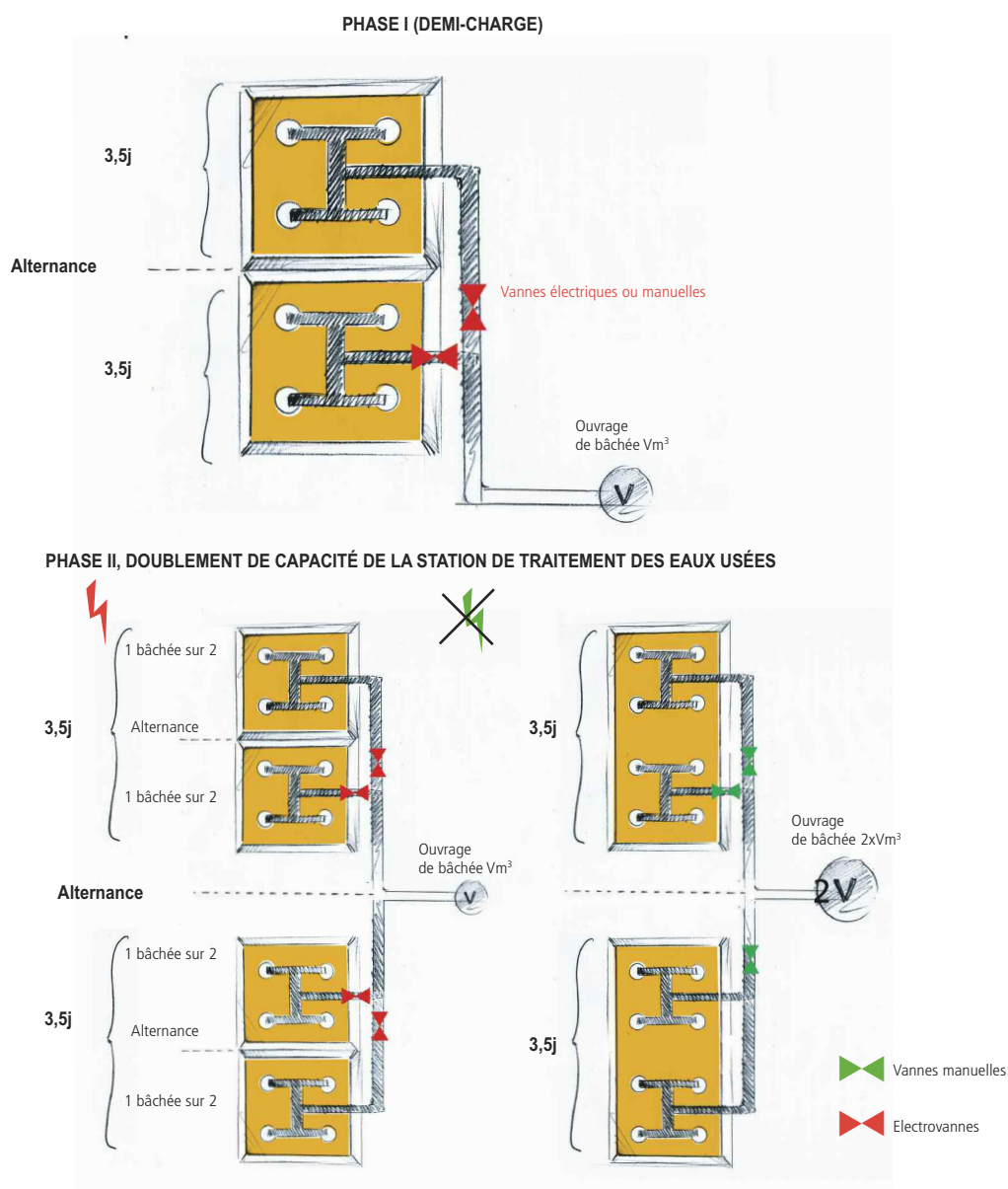


Figure 18. Phasage d'un projet de filtre planté de végétaux (FPV) par partitionnement ou ajout d'une nouvelle file eau.

De la même manière, une fois que les filtres sont réalisés, il est possible de n'en mettre qu'une partie en service, ce qui permet de faire des économies sur les frais d'exploitation. Il est possible, pour un coût modeste, de partitionner chaque casier avec des ondulines et de placer des brides sur le système d'alimentation pour isoler les points d'alimentation non utilisés (Figure 19).

Il peut être utile de prendre des dispositions pour maîtriser le peuplement végétal des adventices* sur les filtres non utilisés. En Guyane, un casier vierge peut se transformer en une année en une véritable forêt arbustive. Même si le développement végétatif est plus lent dans les autres DOM, il est préconisé de couvrir le filtre non usité par un géotextile perméable et d'assurer une surveillance et un entretien régulier si nécessaire. Laisser faire un développement végétal indésirable sera préjudiciable à la future mise en service en créant de fortes contraintes de développement liées à la compétition avec les adventices résiduelles, leurs réseaux racinaires, les graines parsemées...



© Irstea

Figure 19. Exemple de partitionnement sur la station de Taupinière (Martinique). Au premier plan, le filtre est partitionné à l'aide d'ondulines. Une bride a été mise en place pour isoler les points d'alimentation desservant le demi-filtre qui n'est pas en service. À l'arrière-plan, les casiers qui forment la seconde file de la station ne sont pas en service et n'ont pas été plantés.

Règles de dimensionnement et matériaux

Une fois que le choix de la filière de traitement a été fait, les caractéristiques des différents ouvrages qui la composent sont définies à l'aide de ratios de dimensionnement. Ces ratios permettent d'obtenir la surface des filtres qui sera utilisée pour calculer le volume de l'ouvrage d'alimentation, la composition du réseau d'alimentation et de celui de drainage. Les caractéristiques des différents matériaux utilisés pour chaque ouvrage sont également présentées dans ce chapitre.

3.1. Protection des ouvrages

Quelle que soit la variante de FPV retenue, l'alimentation se fait avec des eaux usées brutes, il n'y a donc pas de prétraitement pour les eaux usées domestiques. Un dégrillage est tout de même obligatoire pour protéger les ouvrages et s'assurer qu'il n'y aura pas d'obstacle à l'écoulement des eaux dans la station. C'est par ailleurs une obligation réglementaire³.

Théoriquement, les vitesses de passage à travers le dégrilleur doivent être comprises entre 0,3 et 1,2 m/s de manière à éviter les dépôts des matières les plus lourdes dans le canal et le passage d'objets volumineux souples (ex. : bouteilles plastiques).

En pratique, il peut être implanté sur le canal d'alimentation, être manuel ou automatique et dans le cas où l'alimentation se fait via un poste de relevage, être intégré à ce dernier (panier dégrilleur). Le choix d'un équipement électromécanique doit intégrer la contrainte climatique qui tend en milieu tropical à dégrader prématurément les pièces d'usure et les parties oxydables. Une protection du soleil et de l'eau sera toujours bénéfique dans la durée.

Dans tous les cas, le système de dégrillage doit remplir les conditions suivantes :

- un **entrefer de 20 à 40 mm** (dans le cas d'un entrefer de 20 mm, le dégrilleur doit être automatique) ;
- un **canal de dérivation** doit être prévu en cas de colmatage du dégrilleur ;
- un outil de raclage adapté à l'entrefer est fourni ;
- la présence d'un **bac d'égouttage** et de stockage des refus de dégrillage.

3- Article 22 de l'arrêté du 21 juin 1996.

3.2. Dimensionnement des filtres

3.2.1. Ratios de dimensionnement

Le dimensionnement des FPV est basé sur des charges acceptables sur le filtre en fonctionnement. Le ratio de dimensionnement utilisé est 350 g DCO/m²/j appliqué sur le filtre en fonctionnement. Les charges admissibles sont consignées dans le Tableau 8. Elles reviennent à mettre en œuvre des filtres d'une surface unitaire proches de 0,4 m²/EH pour des eaux usées domestiques classiques.

Cependant, il convient de préciser que le **dimensionnement se fait sur la base de charges appliquées et non de surface par EH**. L'application directe de surface peut conduire à de mauvais dimensionnements suivant les caractéristiques des eaux à traiter (présence d'activité particulière sur le territoire de la collectivité par exemple). Il convient donc, lorsque les données sont disponibles, de vérifier les surfaces obtenues à partir des ratios pour chacun des paramètres, en particulier pour la charge hydraulique, qui peut être très élevée dans les DOM (partie 1.5.1 p. 21).

Tableau 8. Charges de dimensionnement sur le filtre en fonctionnement d'un filtre à écoulement vertical librement drainé de premier étage

Paramètre	MES	DCO	DBO ₅	NTK	CH (m/j)
g/m ² /j	150	350	150	30	< 0,75

La charge limite hydraulique concerne des charges régulières non liées au temps de pluie (eaux claires parasites par exemple). Prost-Boucle et Molle (2012) ont montré qu'au-delà de 75 cm/j, les performances sur la nitrification diminuent en hiver. Même en climat tropical, on conseillera d'ajuster la surface des filtres pour maintenir la lame d'eau quotidienne apportée sur le filtre inférieure à cette limite. En cas de recirculation, le volume d'eau recirculé doit être pris en compte dans la charge hydraulique sur le filtre en fonctionnement.

Exemples de dimensionnement

Exemple 1 : création d'un lotissement

Le maître d'ouvrage d'un lotissement de 40 habitations, soit 180 habitants théoriques, souhaite mettre en place un assainissement par FPV. Comme il n'est pas possible de réaliser de campagne de mesures sur le réseau, puisque non encore construit, le dimensionnement se basera sur la définition de l'EH et les données théoriques moyenne de production (partie 2.3.1 p. 32) : 45 g DBO₅/hab/j.

180 hab x 45 g DBO₅ hab/j → 8 100 g DBO₅/j

8 100 g DBO₅/j / 60 g DBO₅/EH/j → 135 EH

135 EH x 0,8 m²/EH → 108 m²

En l'absence de données terrain, le dimensionnement à partir des valeurs théoriques amène à mettre en place deux filtres de 54 m² pour une surface totale de 108 m².



Exemple 2 : réhabilitation d'une boue activée

Suite à des constats répétés de lessivage des boues sur un de ses ouvrages, une collectivité souhaite remplacer une de ses boues activées par un FPV. Les valeurs moyennes des derniers suivis sont les suivants : 220,8 m³/j, 344,6 mg DCO/L, 163 mg DBO₅/L.

$$344,6 \text{ mg DCO/L} \times 220,8 \text{ m}^3/\text{j} \rightarrow 76\,088 \text{ g DCO/j}$$

$$76\,088 \text{ g DCO/j} / 350 \text{ g DCO/m}^2/\text{j} \rightarrow 217,5 \text{ m}^2$$

Sur la base du flux de DCO à traiter, il faudrait deux casiers de 217,5 m². Il faut ensuite vérifier que cette surface est suffisante pour le traitement des autres paramètres.

$$163 \text{ mg DBO}_5/\text{L} \times 220,8 \text{ m}^3/\text{j} \rightarrow 35\,990 \text{ g DBO}_5/\text{j}$$

$$35\,990 \text{ g DBO}_5/\text{j} / 150 \text{ g DBO}_5/\text{m}^2/\text{j} \rightarrow 240 \text{ m}^2$$

$$220,8 \text{ m}^3/\text{j} / 217,5 \text{ m}^2 \rightarrow 1,02 \text{ m/j}$$

$$220,8 \text{ m}^3/\text{j} / 240 \text{ m}^2 \rightarrow 0,92 \text{ m/j}$$

$$220,8 \text{ m}^3/\text{j} / 0,75 \text{ m/j} \rightarrow 294,5 \text{ m}^2$$

Dans le cas présent, à cause d'un déséquilibre (DCO/DBO₅) ainsi que d'une dilution importante des effluents (entrée d'eaux claires parasites suspectée), le dimensionnement obtenu à partir du flux de DCO ne permet pas de traiter la charge en DBO₅, ni d'accepter les charges hydrauliques. C'est le paramètre limitant (ici la charge hydraulique) qui impose le dimensionnement. Dans le cas présent, il est donc conseillé de réaliser deux filtres de 295 m².

3.2.2. Mode constructif

Il existe deux modes constructifs principaux : les casiers béton ou le déblai-remblai. Pour des raisons de coût, c'est bien souvent le second qui est choisi. L'emprise au sol est un peu plus importante du fait des talus. La surface calculée correspond à la surface au point le plus haut du garnissage du filtre. Les pentes des talus vont réduire la surface du filtre avec la profondeur. Pour certaines configurations (hauteur de filtration importante, fond saturé), il est préférable d'augmenter au maximum la pente des talus, en particulier si les filtres sont petits, ce qui permet de garder un volume conséquent pour le développement des bactéries autotrophes ou pour la zone anaérobie.

La pente des talus est de 3 horizontal pour 2 vertical en cas de pose de géomembrane, l'idéal étant 1 pour 1 mais la faisabilité dépend de la qualité des sols.

Les casiers béton présentent l'avantage de limiter la possibilité aux adventices venues de l'extérieur de coloniser l'intérieur du filtre.

3.2.3. Hauteur de revanche

La hauteur de revanche, qui se définit comme la distance entre le niveau haut de la couche superficielle du filtre et le point haut de la berge du filtre doit être choisie pour répondre à deux objectifs :

- assurer le stockage des boues en surface jusqu'à 20 centimètres ;
- contenir les lames d'eau appliquées par temps de pluie. Dans les régions pluvieuses de métropole, les filtres qui traitent les temps de pluie (réseaux unitaires) ont des revanches de 70 cm pour limiter le nombre de surverses annuelles (Arias Lopez, 2013).

Une hauteur de revanche de 70 cm est préconisée en milieu tropical. Elle permettra de limiter le nombre de surverses y compris lorsque le système sera âgé et comptera 20 cm de boues accumulées en surface.

Pour des raisons d'économies, il est possible de réaliser un terrassement commun pour les deux filtres en parallèle (Figure 20). Dans ce cas, c'est une cloison qui assure la séparation entre les filtres. Cette dernière est ancrée dans les talus formant les berges du filtre. Elle doit être strictement imperméable pour éviter des transferts d'un filtre à l'autre, de manière à ce que les périodes de repos soient respectées. Idéalement, la partie enterrée fait la hauteur de la couche de filtration, avec un minimum de 70 cm de revanche en surface. Les couches de transition, de drainage ainsi que le réseau d'aération drainage peuvent être communs. La partie supérieure de la cloison doit atteindre, au minimum, le niveau de revanche.



© Istea

Figure 20. Cloison de séparation de 2 filtres dans le même casier. On remarque qu'elle aurait pu être un peu plus haute (20-30 cm) pour ménager une hauteur de revanche plus importante. Station de Champ d'Ylang 1, lors de son inauguration en novembre 2015, commune de Combani (Mayotte).

3.3. Ouvrages et réseau d'alimentation

Afin d'assurer une bonne ré-oxygénation du massif filtrant et une bonne répartition des eaux brutes, l'alimentation des filtres se fait avec un débit bien supérieur au débit entrant dans la station. Cette alimentation par bâchées se fait depuis un ouvrage qui stocke les effluents le temps que le volume d'une bâchée soit constitué, puis qui l'exporte rapidement avec un débit important vers le filtre en fonctionnement *via* le réseau d'alimentation.

3.3.1. Caractéristiques des bâchées

Selon la topographie du site et des choix techniques (Tableau 5), l'alimentation peut être gravitaire ou assurée par un poste de refoulement. Dans tous les cas, les bâchées doivent présenter les caractéristiques suivantes :

- **un volume** correspondant à une **lame d'eau de 2,5 à 5 cm** sur toute la surface du filtre en alimentation. Inférieure à 2,5 cm, la bâchée ne provoque pas de flaquage et limite la répartition uniforme des effluents. Au-delà de 5 cm, le temps d'accumulation dans l'ouvrage de bâchées est conséquent et peut générer des nuisances olfactives. De même, si les passages préférentiels au sein du filtre deviennent trop importants, la vitesse d'infiltration augmente, ce qui nuit aux rendements. Dans le cas d'une alimentation par poste de relevage, le volume des bâchées doit prendre en compte le volume mort des canalisations qui retournera dans le poste à l'arrêt des pompes ;
- **un débit instantané supérieur à 0,5 m³/h/m² de filtre en cours d'alimentation**. Ce débit d'alimentation permet d'assurer l'autocurage des conduites d'alimentation et une bonne répartition.



Pour des stations de grosse capacité, les surfaces de filtres sont importantes, ce qui implique de produire des bâchées avec des débits d'alimentation très élevés. Les équipements adéquats sont chers. Une manière de réduire ce coût est de mettre en place plusieurs lignes de traitement en parallèle, avec un seul ouvrage d'alimentation. La surface de filtres alimentés est par conséquent plus faible, donc le volume et le débit d'alimentation de la bâchée sont également divisés par le nombre de files. En contrepartie, il faut mettre en place un système d'électrovannes géré par automate, qui permettra d'alterner chaque bâchée entre les files ou d'avoir plusieurs pompes dans le poste de relevage (une pour chaque file au minimum) fonctionnant en alternance. Les phases d'alimentation/repos ne changent pas (3,5 j/3,5 j).

Les électrovannes réduisent la robustesse du système. Si le maître d'ouvrage fait ce choix technique, il devra avoir du personnel compétent apte à intervenir rapidement en cas de panne.

3.3.2. Alimentation gravitaire

Trois types de dispositifs existent : les siphons auto-amorçants, les chasses à clapet et les chasses pendulaires. Les chasses à clapet sont toutefois à proscrire pour les eaux usées brutes (mais peuvent être utilisées pour un second étage).

Le dispositif choisi est mis en place dans une bêche de stockage des eaux correspondant au volume recherché. La capacité est déterminée par le débit instantané que le dispositif peut délivrer et qui est calculé en prenant en compte les pertes de charge dans le réseau d'alimentation en aval. La vidange de la bêche doit être complète pour éviter l'accumulation des dépôts en fond d'ouvrage. Différents types d'ouvrages délivrant des bâchées ont été installés dans les DOM. Ils fonctionnent de manière satisfaisante, les pièces d'usure ont été remplacées à des fréquences correspondant à ce qui est annoncé par le constructeur. Un compteur de bâchées mécanique peut être associé au dispositif, il permet de connaître le nombre de bâchées quotidiennes lors d'un suivi.

3.3.3. Alimentation par un poste de relevage

Quand la topographie ou la présence d'une boucle de recirculation l'impose, l'alimentation des filtres se fait par un poste de relevage.

Ce dernier est équipé de deux pompes qui fonctionnent en alternance. En cas de panne de l'une, l'alternance des filtres doit pouvoir être maintenue par le biais d'un jeu de vannes. Les pompes sont généralement déclenchées par des poires de niveaux. Le diamètre minimal des canalisations et des pompes est DN80. Le volume mort perdu dans les canalisations, qui revient au poste après chaque bâchée, doit être pris en compte dans le réglage des niveaux de déclenchement afin d'envoyer le bon volume sur le filtre en fonctionnement. La pose de clapets anti-retour est envisageable, l'inconvénient étant que les effluents peuvent séjourner longtemps dans les canalisations lors de l'alternance.

Des compteurs horaires sont intéressants à installer sur les pompes et permettent après tarage des pompes une évaluation assez précise des volumes pompés (une évaluation ne vaut pas mesure au sens de l'arrêté du 21 juillet 2015 ; partie 5.4.2 p. 63).

3.3.4. Réseau d'alimentation

Pour optimiser la répartition des effluents à la surface du filtre alimenté, le nombre de points d'alimentation est déterminé de manière à avoir au minimum **un point pour 50 m²** de filtre. Pour des raisons de géométrie, ils sont généralement par paire, voire multiples de 4. Une plaque anti-affouillement* est placée sur le filtre à l'aplomb de chaque point d'alimentation de manière à casser le flux d'eaux usées et protéger le massif (Figure 21).

En fonction du type d'ouvrage qui délivre les bâchées, les réseaux d'alimentation sont différents.

Dans le cas d'une alimentation en gravitaire, le réseau est aérien (Figure 21). Il est entièrement inspectable et démontable. Il doit être réalisé en PEHD, voire en inox, de manière à résister aux UV.

Si l'alimentation se fait via un poste de relevage, le réseau peut être enterré. Seule la partie terminale est à protéger du soleil, le reste peut être en PVC. Le réseau prend généralement la forme d'un double H. Les canalisations ont un diamètre décroissant, DN100 minimum. Le réseau est conçu pour se vider entièrement à chaque bâchée, évitant ainsi la stagnation, l'accumulation de matières, le développement d'odeurs ou le risque de colmatage. Les eaux usées brutes doivent circuler en tout point du réseau avec un débit supérieur à 0,6 m/s-1 (vitesse d'autocurage).



Figure 21. Réseau d'alimentation aérien avec la plaque anti-affouillement (à gauche), ou enterré lors d'une bâchée (à droite).

3.4. Réseau d'aération-drainage

Le réseau de drainage est relié à ses extrémités à l'atmosphère par des tubes droits formant des événements et couverts d'un chapeau. C'est le passage qu'emprunte l'air contenu dans le massif et chassé lors d'une bâchée. C'est également grâce à lui que se font les transferts diffusifs depuis le fond du filtre (Petitjean, et al., 2011). Il porte donc le nom de réseau d'aération-drainage puisqu'il remplit ces deux fonctions.

Le réseau se compose de tubes en PVC (à l'exception des événements et de leurs chapeaux), DN100 minimum, présentant des entailles orientées vers le bas de 1 cm de large tous les 10 cm, sur un tiers de la circonférence du tube (Figure 22). Les coudes à angle droit sont à éviter. L'utilisation de tubes de classe de résistance élevée (CR8) limitera les risques de détérioration lors d'opérations de maintenance lourde (curage). Les drains agricoles sont à proscrire, les trous étant trop petits.

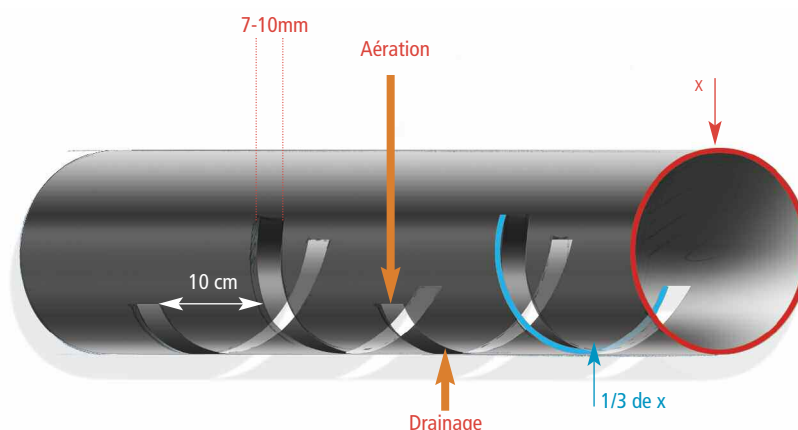


Figure 22. Schéma des canalisations d'aération-drainage.

Le fond du filtre, sur lequel repose le collecteur principal du réseau, présente une pente supérieure à 0,5 %. Selon les configurations (couche filtrante > 50 cm, NS/S), des étages de drains intermédiaires présentant des caractéristiques identiques sont mis en place pour augmenter l'aération du massif.

La densité des drains se calcule à partir de la surface des filtres et doit être supérieure à 0,25 m linéaire par m² de filtre.

3.5. Étanchéité et matériaux

Composé de différentes couches de graviers, le massif filtrant est isolé du sol par une enveloppe artificielle (géomembrane) ou naturelle (sol compacté).

3.5.1. Étanchéité artificielle, naturelle et infiltration

Le fond des filtres est généralement étanchéifié par un revêtement synthétique. Il doit être opaque, résistant aux UV, résistant au poinçonnement (rhizomes et matériaux), ce qui nécessite l'ajout d'un géotextile sous et sur la géomembrane.

Le Comité français des géosynthétiques (1991) recommande des épaisseurs minimales pour les membranes en fonction de leur constitution. Elles sont de 1 mm pour le PVC et le PP (polypropylène), 1,5 mm pour le PEHD, 1,14 mm pour l'EPDM. Une étanchéité bitumineuse est à proscrire car sensible au percement des rhizomes. Ces préconisations sont complétées par le Laboratoire des ponts et chaussées/Setra (2000) qui précise les modalités d'assemblage, le recouvrement des lés, des ouvrages de génie civil ou les canalisations. La pose de la géomembrane doit être réalisée par des applicateurs certifiés ASQUAL, en particulier pour les soudures entre membranes.

La géomembrane doit couvrir les berges sur une hauteur au moins égale à celle de la revanche et être ancrée au sommet. Les parties aériennes de la membrane sur la face interne des talus sont protégées des rayonnements UV par une couche de graviers de protection. Il est recommandé de s'assurer qu'un dispositif de drainage de gaz sous la géomembrane est prévu, ainsi que des mesures en cas de remontée de nappe en fonction du contexte.

3.5.2. Matériaux de garnissage des filtres

La qualité des matériaux de garnissage des casiers est fondamentale pour la pérennité du système. Les matériaux doivent avoir une granulométrie homogène et être lavés de manière à présenter une teneur en fines particules ($d < 63 \mu\text{m}$) inférieure à 3 % en masse. La présence de fines en excès peut conduire à un colmatage irréversible du système en profondeur. L'utilisation de graviers concassés ou de matériaux volcaniques nécessite une attention particulière pour assurer leur homogénéité et l'absence de fines. Les caractéristiques (granulométrie, dureté du matériau et composition en calcaire [exprimée en CaCO_3]), la provenance des matériaux ainsi qu'un schéma de mise en œuvre des couches (épaisseurs) doivent être fournis par le constructeur.

La résistance des matériaux à la fragmentation doit être prise en compte. En effet, lors du transport en camion et du garnissage du filtre, les matériaux vont s'entrechoquer, subir des pressions. S'ils sont trop friables, la granulométrie va se réduire au profit d'une fraction de fines trop importante. La qualité du matériau peut évoluer de manière conséquente entre sa production et le moment où elle se retrouve en place. Pour cette raison, il est

conseillé de relaver les matériaux avant leur mise en place sur site, plusieurs fois si nécessaire, jusqu'à ce que l'eau de lavage ne charrie plus de fines. Les tests de Los Angeles (NF 1097-2 matériaux grossiers) et micro-Deval (NF 1097-1 matériaux fins) permettent de déterminer la résistance des matériaux à la fragmentation. Leur échelle va de 0 (très dur) à 100 (très friable). Il est conseillé de ne pas sélectionner de matériaux avec des valeurs supérieures à 35.

L'eau, en particulier quand elle est acide, dissout le calcaire ce qui nuit à la tenue des matériaux dans le temps. La nitrification peut aussi avoir cet effet-là. La teneur limite en calcaire est fixée à 20 % de la masse du matériau.

Les FPV sont composés de 3 couches de graviers de granulométrie croissante du haut vers le bas :

- **couche filtrante.** Elle est responsable du traitement à travers ses capacités de rétention physique des particules solides et de support pour le développement de la biomasse épuratrice. Elle a une **épaisseur de 30 à 80 cm** en fonction de la variante retenue (Tableau 5 p. 30). À partir d'une épaisseur de 60 cm, il convient de placer au milieu de la couche de filtration, un drain d'aération intermédiaire. Il est connecté au reste du réseau d'aération, et ses fentes sont orientées vers le bas. La couche filtrante est composée de graviers de 2 à 6 mm. Elle est composée de **graviers de 2 à 6 mm** présentant un coefficient d'uniformité (CU) inférieur à 5 ;

- **couche de transition.** Son rôle est d'empêcher la migration des graviers fins de la couche filtrante dans la couche drainante. De 10 à 20 cm d'épaisseur, sa granulométrie est définie à partir de celle de la couche filtrante et de la règle de transition granulométrique suivante, dérivée des règles de Terzaghi :

$$d_{15} \text{ couche de transition} \leq 5 \times d_{85} \text{ couche filtrante}$$

Les granulométries des couches supérieures et inférieures amènent généralement à du gravier 5/20 mm ;

- **couche drainante.** Elle est parcourue par le réseau d'aération-drainage qui récupère et évacue les effluents traités. C'est elle qui rattrape la pente de 0,5 % en fond de filtre. En l'absence de zone saturée, son épaisseur est de 10 à 20 cm. Pour la variante NS/S, son épaisseur sera de 10 à 20 cm de plus que la hauteur de saturation. Elle est composée de graviers grossiers de **20 à 60 mm**. La règle de Terzaghi énoncée plus haut est aussi de rigueur.

3.6. Dimensionnement des filtres horizontaux

Les règles de dimensionnement des filtres à écoulement horizontal en zone tropicale se basent sur deux notions : l'une liée à l'hydraulique et l'autre à la dégradation des polluants.

3.6.1. Hydraulique

Bien que d'apparence simple, le dimensionnement hydraulique des filtres plantés à écoulement horizontal fait apparaître plusieurs difficultés pouvant conduire à des changements drastiques des conditions de fonctionnement, voire des dysfonctionnements. L'apparition d'écoulements de surface en est l'exemple le plus caractéristique. Ils ont été observés dans la plupart des pays pionniers de ce type d'ouvrages (USA, Royaume-Uni, Danemark) et spécialement lors de l'utilisation de sol en place (Allemagne).

Bien que non parfaitement applicable aux conditions hydrauliques des filtres, l'équation de Darcy est souvent utilisée pour déterminer la section hydraulique (largeur et profondeur) du filtre pour s'assurer que l'eau s'écoule à l'intérieur du massif filtrant.

Elle est représentée de la manière suivante :

$$q = \frac{Q}{As} = -k_s \frac{dH}{dx}$$

où :

q : débit d'entrée d'eau par rapport à la section de passage, m/j

Q : débit d'eau, m³/j

As : section de passage, m²

dH/dx : gradient hydraulique, ad.

ks : perméabilité du milieu, m/j

Tout filtre à écoulement horizontal se colmate dans le temps par accumulation de matière organique réfractaire, dépôt de MES inertes, précipités, développement de biomasse ou du système racinaire... Il en résulte une diminution de la porosité et donc de la perméabilité du milieu. Le dimensionnement hydraulique des filtres doit donc prévoir ce colmatage de manière à éviter des écoulements de surface dans le temps. Cela revient à prévoir l'influence de ce colmatage sur la perméabilité du milieu. Lorsque le filtre à écoulement horizontal est placé en aval d'un premier étage de filtre planté à écoulement vertical, une chute de la perméabilité d'un facteur 10 est à prendre en compte par rapport à la perméabilité d'origine. On retiendra la nécessité de mettre en œuvre des matériaux allant de granulométrie de types 3/6 mm à 15/20 mm.

3.6.2. Dégradation des polluants

Le dimensionnement lié aux performances épuratoires revient à fixer le temps de séjour de l'effluent au sein du système pour garantir une efficacité de traitement. La largeur et la hauteur étant fixées par ailleurs (dimensionnement hydraulique), cela revient à fixer la longueur du filtre. Pour cela, différents modèles ont été proposés dont le plus utilisé actuellement est le modèle k-C*. Ce modèle se base sur une dégradation du premier ordre (k) ainsi que sur une concentration bruit de fond liée à un flux de retour des polluants dans l'eau et un écoulement piston. Bien qu'imparfait, il permet une approximation du temps de séjour à mettre en œuvre dans un filtre pour un niveau de rejet visé.

$$\frac{C - C^*}{C_{in} - C^*} = \exp(-k_v \tau)$$

Où :

C et C* : concentration (in : entrée) et concentration bruit de fond (C*) d'un polluant, g/m³

k_v : constante volumique de dégradation d'un polluant J⁻¹; temps de séjour, J

Les effets de la température sur la constante k_v peuvent être exprimés par une loi du type Arrhenius :

$$k_T = k_{20} \cdot (T-20)$$

Mise en œuvre après un premier étage de filtre planté à écoulement vertical non saturé, une surface de 1 m²/EH permet d'atteindre des teneurs inférieures à 25 mg DBO₅/L.

Cette configuration n'a pas été testée dans le cadre des projets pour les départements d'outre-mer. Il n'est donc pas possible d'assurer que ce dimensionnement est optimisé. Le lecteur pourra se référer à des ouvrages plus détaillés pour adapter le dimensionnement (Dotro, *et al.*, 2017).



4

Quelles plantes pour les FPV dans la zone tropicale ?

Les plantes, par leur action mécanique, sont indispensables au fonctionnement des FPV. *Phragmites australis* est utilisée en France métropolitaine comme à l'étranger. Cependant, cette espèce n'est pas présente naturellement dans la zone tropicale où elle présente un risque invasif marqué. L'adaptation des FPV passe donc par la sélection d'espèces endémiques des tropiques, qui puissent être substituées à *Phragmites australis*.

Une étude spécifique a été mise en place et a permis d'évaluer une centaine d'espèces (Lombard-Latune et Molle, 2016). Les conclusions du rapport final sont présentées ci-après.

La recherche d'une plante de substitution a nécessité dans un premier temps d'explicitement clairement les besoins. À partir de ces derniers, des critères de sélection ont été définis. Ils permettent de s'assurer que les plantes seront adaptées au biotope particulier que représentent les filtres, au rôle mécanique recherché ainsi qu'à l'écologie (au sens d'équilibre entre les espèces vivantes) des milieux dans lesquels s'insèrent les filtres.

L'environnement FPV en lui-même impose :

- le développement dans un substrat sablo-graveleux non saturé et bien drainant ;
- la résistance à des apports conséquents de matières organiques peu évoluées, avec possible installation transitoire d'un milieu anoxique ;
- la résistance au stress hydrique : alternance marquée des phases d'alimentation (> 400 mm/j pendant 3,5 jours) et de repos (3,5 jours sans apports) ;
- la faculté à pousser en plein soleil (absence d'ombre).

Par rapport au rôle attendu, les végétaux doivent impérativement présenter les caractéristiques intrinsèques suivantes :

- plantes pérennes non ligneuses ;
- développement rapide et homogène pour coloniser rapidement la surface du filtre et éviter un développement « en touffes » qui limiterait la surface du filtre réellement active ;
- plantes rhizomateuses, avec idéalement d'importants rhizomes dans les 50 premiers cm du filtre ;
- ne pas être considérés comme invasifs, avec une faible production de graines (pour limiter la dissémination) ;
- hauteur supérieure à 60 cm et diamètre des tiges compris entre 0,5 et 2 cm de manière à garantir à la fois un effet mécanique important et un faucardage* manuel aisé ;
- les feuilles, bractées ou autres organes aériens, ne doivent pas retenir l'eau de pluie, afin d'éviter tout risque sanitaire lié aux moustiques notamment ;

Cycle végétatif

Le cycle végétatif se définit comme la succession d'étapes dans le développement des plantes.

On distingue schématiquement 4 phases.

- **La croissance végétative**, depuis la germination d'une graine ou depuis l'apparition d'un rejet dans le cas d'une multiplication végétative. Elle dure jusqu'à ce que la plante ait atteint un niveau de développement qui lui permette de produire suffisamment d'énergie pour se reproduire.
- **La floraison**, qui correspond à la phase de multiplication sexuée de la plante.
- **La nouaison ou fructification**, qui conduit à la production d'un œuf (graine).
- **La sénescence** : la plante ayant rempli sa fonction reproductrice meurt petit à petit.

- la plante ne doit pas présenter de risque d'irritation ou d'intoxication lors du faucardage.
- Le statut local des espèces doit aussi être pris en compte :
- les plantes ne doivent pas présenter de risque invasif ;
 - les plantes ne doivent pas être des espèces protégées.

4.1 Résultats de l'étude

À partir des critères précédents, une centaine d'espèces différentes ont été étudiées. Une première phase bibliographique a permis d'écarter la plus grande partie des plantes candidates. Une étude à l'échelle pilote a comparé les végétaux sur la base des principaux stress induits par les FPV : stress hydrique et anoxique. La dernière phase de l'étude a permis d'évaluer sur des FPV de taille réelle le comportement des espèces restantes vis-à-vis de la compétition avec les adventices (« mauvaises herbes »), leur cycle végétatif et leur développement, éléments qui servent de base pour la discussion sur les fréquences de faucardage.

Les végétaux les plus intéressants appartiennent à trois groupes botaniques différents : les Zingibérales, les Cypéracées et les Poacées.

4.1.1. Les Zingibérales

Les Zingibérales sont un ordre botanique relativement restreint de plantes que l'on rencontre à l'état naturel uniquement sous les tropiques. Cet ordre compte huit familles pour quelques dizaines d'espèces seulement. Certaines de ces espèces sont cultivées pour leurs caractéristiques ornementales et comptent de très nombreux cultivars*. *Heliconia psittacorum* en compterait plus de 1 200.

Les cinq espèces qui se sont le mieux adaptées aux stress durant la phase pilote de l'étude appartiennent à cet ordre, qui semble donc particulièrement intéressant. À ce titre et étant donné la taille relativement petite de l'ordre, l'étude s'est attachée à une certaine exhaustivité (Figure 23).

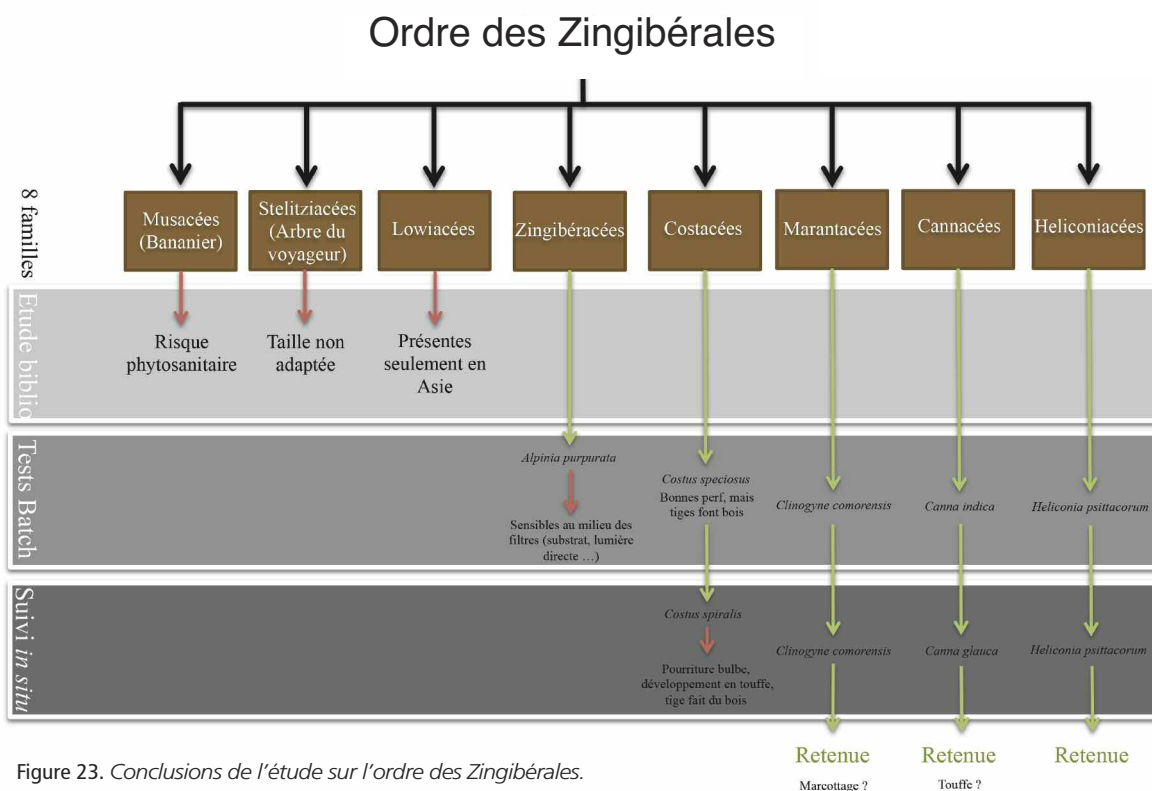


Figure 23. Conclusions de l'étude sur l'ordre des Zingibérales.

Parmi les huit familles que compte l'ordre des Zingibérales, trois d'entre elles n'ont pas été étudiées pour différentes raisons : risque phytosanitaire (Musacées : les bananiers), taille (Stelitziacées : l'arbre du voyageur) ou contraintes géographiques (Lowiacées : présentes en Asie essentiellement). Des représentantes des cinq familles restantes ont été étudiées, deux ont été écartées :

- les Costacées (*Costus spiralis* et *Costus speciosus*) en raison d'une trop faible compétitivité sur les filtres et d'une sensibilité des rhizomes aux eaux stagnantes ;
- les Zingibéracées (*Alpinia purpurata*) qui n'ont pas supporté les conditions des filtres (ensoleillement, substrat).

Les représentantes des trois dernières familles se sont avérées les plus intéressantes à l'issue de cette étude. Elles se caractérisent par un développement relativement lent au regard des autres espèces évaluées. Cela présente l'avantage de limiter le nombre de faucardages annuel, tâche d'exploitation très chronophage. En revanche, leur installation est plus lente et elles peuvent nécessiter un accompagnement au démarrage en arrachant les mauvaises herbes. Une fois ces familles installées, leur feuillage génère une ombre très dense au niveau du sol, ce qui en fait des plantes très compétitives qui laissent peu de place aux adventices.

Il s'agit des familles listées ci-dessous.

■ *Heliconia psittacorum*, de la famille des Héliconiacées (Figure 24).

Son développement est peut-être le plus lent des trois mais est compensé par une meilleure répartition à la surface des filtres. C'est à l'heure actuelle la meilleure alternative pour les FPV. En revanche, elle est génétiquement plus proche du bananier que d'autres familles. De ce fait, elle pourrait se transformer en réservoir pour pathogènes ou ravageurs et ainsi entraîner un risque phytosanitaire important pour des bananeraies à proximité. D'après la Fredon (Fédération régionale de défense contre les organismes nuisibles) de la Martinique, les Héliconiacées pourraient présenter un risque et ne devraient pas être mises en place à moins d'un kilomètre d'une plantation. À l'inverse, les Cannacées présentent peu de risques et doivent être privilégiées dans ces cas-là.



© Irteta

Figure 24. Filtre planté d'*Heliconia psittacorum*.

■ *Canna indica* et *Canna glauca*, de la famille des Cannacées.

Leur développement est très dense, s'approchant plus d'un développement en touffes que les autres. Elles sont donc moins intéressantes qu'*Heliconia*, mais sont préconisées pour les FPV à proximité (< 1 km) des bananeraies. S'il n'y a eu aucun problème à Mayotte (*Canna indica*) ni en Guyane (*Canna glauca*), les filtres plantés de *Canna indica* en Martinique et en Guadeloupe subissent chaque année entre novembre et janvier des attaques de chenilles (Figure 25). Les attaques ne semblent pas mettre en danger la survie des plantes sur les filtres, mais nuisent sûrement à leur développement.



Figure 25. Attaque de chenilles sur *Canna indica* sur la station des Mangles en Guadeloupe.

■ *Clinogyne comorensis* de la famille des Marantacées.

Elle se développe assez rapidement, mais la tige qui porte les fleurs a une tendance à marcotter (Figure 26), ce qui pourrait présenter un risque de formation d'un « tapis » au sol. Cette plante est endémique de Mayotte où elle est menacée. Son utilisation sur les filtres permettrait de la mettre en valeur.



Figure 26. Marcottage sur *Clinogyne comorensis*. Le marcottage* est une propriété des tiges de certaines plantes dont les cellules épidermiques ont la capacité à se différencier en tissus racinaires au contact du sol.

Ces plantes apportent un surplus de robustesse au système car elles peuvent s'adapter à un large spectre de conditions (résistance au stress hydrique, au stress anoxique) et sont peu gourmandes en entretien (fréquence de faucardage faible, autour de 18 mois).

En revanche, elles demanderont un accompagnement lors de la phase de démarrage pour limiter la compétition avec les adventices. Leurs cycles végétatifs n'ont pas pu être déterminés précisément, ils sont en tout cas supérieurs à 12 mois. Il est préconisé de réaliser un faucardage chaque année, juste avant la saison des cyclones, ou avant la saison sèche en Guyane. En effet, une des conséquences du passage de la tempête Matthew a été la verse* des *Heliconia* présents sur la station. Un faucardage préventif en vue de la saison cyclonique permettrait de protéger les végétaux des vents violents.

4.1.2. Les Cypéracées

Les Cypéracées sont une famille botanique largement représentée à travers le monde (plus de 5 000 espèces), dans les régions chaudes essentiellement. Elles font partie de l'ordre des *Poales*. Le comportement des trois espèces étudiées vis-à-vis des stress était moins bon que celui des Zingibérales, mais tout de même au moins comparable à celui des plantes utilisées jusque là sur les filtres en zone tropicale (dont le problème était un développement hétérogène « en touffes » et pas une incompatibilité avec les conditions des FPV).

■ *Cyperus alternifolius* et *Cyperus involucratus*.

Selon les classifications botaniques, ces deux espèces peuvent être distinctes ou ne former qu'une variété unique. Leurs différences sont mineures. Elles ont un développement relativement rapide. Leur feuillage couvre rapidement l'ensemble des filtres limitant le développement des adventices au sol. Après quelques mois, une épaisse couche de végétaux morts se forme au sol. Il est nécessaire de réaliser deux faucardages par an pour maintenir une bonne densité de végétaux et exporter toute la matière végétale produite.

■ *Cyperus papyrus* est moins dense que *C. alternifolius/involucratus*.

Ses tiges sont plus hautes et elle semble mieux résister que ses cousines aux conditions anoxiques. Elle a été utilisée dans la littérature sur des lits de séchage plantés de végétaux (traitement des boues d'épuration et des matières de vidanges). Certains botanistes estiment qu'elle présente un risque de dissémination hors des filtres non négligeable et qu'elle doit être surveillée. Elle n'est pas retenue à l'heure actuelle pour une utilisation sur les FPV.

Les Cyperacées testées se sont avérées être des pistes de substitution intéressantes pour les FPV, même si elles offrent moins de garanties que les Zingibérales en cas de conditions extrêmes. Elles nécessitent moins d'entretien au démarrage, mais un faucardage plus régulier par la suite. Leurs tiges sont plus résistantes et nécessitent un matériel adapté, type taille- haie, pour le faucardage.

4.1.3. Les Poacées

Les Poacées, ou graminées, font également partie de l'ordre des *Poales*. Elles représenteraient 20 % de la végétation globale de la planète et comptent plus de 12 000 espèces, ce qui en fait la 5e famille botanique par le nombre d'espèces. Les quelques espèces évaluées ne semblent pas disposer de mécanismes performants d'adaptation aux stress. *Phragmites australis* étant une Poacée, il y a donc des espèces mieux adaptées que d'autres. Cette famille botanique se caractérise par un développement très rapide, ce qui peut être un atout.

■ *Arundo donax* et *Echinochloa polystachia* paraissent intéressantes pour leur densité de tiges et leur développement rapide. Mais en raison de cycles végétatifs très courts (3-4 mois), la fréquence de faucardage aurait dû être augmentée (3 fois par an) pour maintenir une densité importante. Mais le principal problème rencontré est venu de leur trop forte affinité pour le milieu des filtres. Très rapidement, elles sont sorties des filtres. Elles se développent par marcottage, ce qui accélère leur vitesse de colonisation et entraîne la formation d'un tapis très dense de tiges entremêlées qui bloque toute action mécanique sur la couche de boues. Elles sont à proscrire car malgré un entretien, elles présentent un risque invasif.

■ *Thysanolaena maxima* se développe en touffes, ce que l'on cherche à éviter.

■ *Brachiaria decumbens* est une plante fourragère. Elle est trop petite pour avoir une action mécanique importante si la couche de boues est épaisse. Elle est également assez sensible aux différents stress.

Aucune des Poacées testées n'a finalement été retenue. L'ordre des Poacées est très large et des espèces non étudiées sont certainement intéressantes, en particulier si l'on imagine des systèmes avec une valorisation agricole (plantes fourragères).

4.2 Herbier pour les FPV dans les DOM

À l'issue de cette étude, les plantes retenues pour les FPV dans les DOM sont présentées dans le Tableau 9.

Tableau 9. Présentation synthétique des espèces retenues pour les filtres plantés de végétaux (FPV) dans les DOM

<i>Heliconia psittacorum</i>	<i>Canna indica, canna glauca</i>	<i>Cyperus alternifolius/involucratus</i>
Famille des Héliconiacées, ordre des Zingibérales	Famille des Cannacées, ordre des Zingibérales	Famille des Cypéracées, ordre des Poales
		
© Iristea	© Iristea	© Iristea
Développement très homogène, colonisation progressive de l'ensemble du filtre	Légère tendance à avoir un développement en touffes Colonisation lente de l'ensemble du filtre	Croissance rapide, mais très lente colonisation de l'ensemble du filtre Développement en touffes
Densité moyenne : jusqu'à 250 tiges/m²	Densité moyenne : jusqu'à 250 tiges/m²	Très forte densité : jusqu'à 600 tiges/m²
Très forte compétitivité vis-à-vis des adventices	Très forte compétitivité vis-à-vis des adventices	Forte compétitivité vis-à-vis des adventices
Nécessite un accompagnement à l'installation : arrachage des adventices pendant 3 mois, 1 à 2 fois par mois Faucardage annuel, avant la saison des cyclones	Nécessite un accompagnement à l'installation : arrachage des adventices pendant 3 mois, 1 à 2 fois par mois Faucardage annuel, avant la saison des cyclones	Ne nécessite pas d'accompagnement à la plantation Faucardage tous les 6 mois pour éliminer les tiges mortes et favoriser la colonisation de l'ensemble du filtre
Remarques 1 200 cultivars existent, entraînant une forte hétérogénéité (à l'intérieur même des filtres !). Privilégier les cultivars les plus petits Sa proximité génétique avec le bananier entraîne des risques phytosanitaires si le FPV est à une distance de moins de 1 km d'une bananeraie	Remarque Sur <i>Canna indica</i> en Guadeloupe et Martinique, des attaques de chenilles sont observées de décembre à mars. Elles ne détruisent pas entièrement les plantes mais les affaiblissent	

Mise en œuvre et gestion des ouvrages

5

Cette dernière partie est une synthèse des retours d'expériences sur la mise en œuvre et la gestion des FPV en zone tropicale. Les incidents ayant entraîné une détérioration plus ou moins importante des ouvrages y sont détaillés. Les différentes phases de vie des filtres sont présentées, ainsi que des exemples de métrologie adaptée à la filière dans le cadre de l'autosurveillance.

5.1 Mise en œuvre des FPV

5.1.1 Retours d'expériences de la construction

La question de la qualité des matériaux est un enjeu central dans la réalisation des FPV. En s'affranchissant du second étage, les difficultés d'approvisionnement en sable de qualité sont écartées. Il n'en reste pas moins que les caractéristiques des matériaux recherchées sont assez spécifiques (partie 3.5.2 p. 42), conduisant par exemple les carrières à investir pour adapter leur production. En 2016, le premier FPV a été construit à la Réunion. Il y a désormais des FPV dans chacun des DOM et donc des solutions pour l'approvisionnement en matériaux.

Malgré tout, il est intéressant que le maître d'œuvre prévoie une analyse granulométrique qui viendrait en complément des informations fournies par les fournisseurs. En cas d'écart trop important avec les préconisations, il est conseillé de demander à la carrière de produire un nouveau lot de matériaux.

Enfin, le lavage des matériaux sur site avant leur mise en place dans les filtres est indispensable. Le transport de matériaux concassés peut entraîner leur détérioration et produire des fines qu'il faut éliminer.

La réalisation des filtres doit être pensée pour garantir leur pérennité dans le temps. L'arrivée de matières minérales sur les ouvrages est un risque majeur qui va accélérer leur colmatage en profondeur et réduire très fortement leur durée de vie. Pour cette raison, les filtres doivent être protégés du ruissellement (Figure 27).



Figure 27. Coulée de boue sur le filtre planté de végétaux (FPV) de Salazie à la Réunion.

© ODE de la Réunion

Les géomembranes, même si elles ont reçu une protection contre les UV, gagnent à être protégées des rayonnements solaires, par une couche de graviers par exemple. Il faut alors penser à aménager un ou plusieurs accès à la surface des filtres pour l'exploitation et le suivi.

En fonction de la taille des casiers, une voie carrossable doit être aménagée sur au moins l'un des côté afin de permettre l'accès aux engins pour le curage des filtres.

5.1.2 Liste des documents à fournir et des essais à réaliser par le constructeur

Une liste indicative et non exhaustive des documents à fournir par le constructeur et des essais à réaliser au cours de la construction et de la phase de démarrage des FPV est proposée (Tableau 10). Le « Cadre guide pour un CCTP filtres plantés de roseaux » (Pôle d'appui technique aux services déconcentrés du ministère de l'Agriculture, 2007) apporte de précieux compléments pour la réalisation des essais.

Tableau 10. Liste des documents à fournir et des essais à réaliser par le constructeur lors de la phase de démarrage de la station

	Justificatif constructeur	Objet	Essai associé
Matériaux	Caractéristiques, schéma et procédure de mise en œuvre des couches	Géomembrane : fiche fournisseur, épaisseur, résistance (pour géotextile : résistance à la traction, allongement, poinçonnement)	Vérification des joints des membranes, test d'étanchéité
		Gravier : fiche fournisseur, granulométrie, dureté, teneur en fines, analyse granulométrique complémentaire	Lavage sur site avant mise en place, vérification de la planéité après mise en place
Réseaux	Caractéristiques, plans d'exécution et procédure de mise en œuvre, calculs techniques et hydrauliques	Réseau d'alimentation : fiche fournisseur des caractéristiques des canalisations, plans d'exécution, manuel d'intervention pour le curage du réseau	Vérification des systèmes de répartition (débit équivalent à tous les points d'alimentation) Contrôle visuel des conduites
		Réseau de drainage : fiche fournisseur des caractéristiques des canalisations, schéma et photos de la préparation des drains, plans d'exécution	Test des drains, contrôle visuel des drains
Matériel mécanique et électromécanique	Manuels de maintenance et fonctionnement, cahier de recette usine, PV de conformité électrique, calculs techniques et hydrauliques	Pour tous les équipements : justification de leur adéquation au projet sur la base de leurs caractéristiques, respect des contraintes de pose et d'emploi, mode opératoire en cas de dysfonctionnement	
		Panier dégrilleur et poste de pompage : condition de relevage, courbes de fonctionnement, fréquence et mode d'entretien	Tarage pompe/siphon, mesure de débit
		Ouvrage d'alimentation gravitaire : mode de fonctionnement, fréquence et mode d'entretien	
		Vannes et électrovannes : fréquence et mode d'entretien	Test de fonctionnement et d'étanchéité des vannes
Végétaux	Schéma et plan de mise en œuvre	Nom et origine des espèces (fournisseur), justification des variétés choisies, densité de plantation, fréquence de fauchage, détail de la conduite pendant la période d'adaptation (arrachage mauvaises herbes, arrosage), période la plus favorable de plantation	Évaluation du taux de reprise à 1 et 3 mois

5.1.3 Incidents majeurs ayant impacté les stations

Sur les dix années de recul dont on dispose, seuls deux incidents ont eu des impacts forts sur le fonctionnement des FPV.

Le premier est dû à une entrée de latérites* dans le réseau de collecte à l'amont de la station. D'une part le réseau était de mauvaise qualité avec près de 50 % d'eaux claires parasites, d'autre part plusieurs riverains auraient aménagé des réseaux de drainage de leurs parcelles directement raccordés aux boîtes de branchement du réseau.

Or les fines particules minérales sont difficilement retenues à la surface des filtres, surtout en l'absence de couche de boues. Elles se sont accumulées en surface et ont pénétré en partie dans le massif, conduisant à un colmatage (Figure 28). La couche de dépôt a été curée pour retrouver une perméabilité acceptable mais l'accumulation en profondeur nécessiterait un lavage ou un remplacement de matériau.

Cette expérience montre la nécessité d'être vigilant sur l'arrivée potentielle de latérite sur le filtre (via le réseau ou par ruissellement de surface au niveau de la parcelle de la station) ; une vigilance accrue est nécessaire en phase de travaux.



© Etage Guyane

Figure 28. Colmatage du filtre de Bois d'Opale 1 par des latérites.

Le second incident a eu des conséquences beaucoup moins dramatiques pour les ouvrages. À l'occasion d'une marée particulièrement forte en Martinique, des eaux de mer sont rentrées dans le réseau de collecte au niveau du trop-plein d'un regard qui n'était pas équipé de clapet anti-retour. Les plantes du filtre en service n'ont pas supporté la salinité et sont mortes en quelques jours (Figure 29). Malgré un faucardage, les plantes ont eu du mal à repartir. Les conséquences sur les performances des filtres ont été nulles et ont nécessité de replanter des végétaux.

Dans chacun des deux cas, c'est la mauvaise qualité du réseau qui a entraîné un impact sur le fonctionnement de la station. Cette dernière est de la responsabilité du maître d'ouvrage.



© Ixstea

Figure 29. Mort des *Thysanolaena maxima* au niveau des points d'alimentation, station de Mansarde Rancée en Martinique.

À noter que certains animaux présents sur les filtres peuvent en altérer le fonctionnement comme les reptiles de type iguanes qui peuvent venir nicher dans les filtres et coucher les végétaux sous leur poids. Cette problématique nécessite un faucardage des végétaux pour éviter leur pourrissement en surface du filtre.

5.2 Les différentes phases de fonctionnement des filtres

Au cours de leur vie, les FPV peuvent connaître jusqu'à cinq phases de fonctionnement différentes : démarrage, fonctionnement normal, fonctionnement dégradé, curage et colmatage définitif.

5.2.1 Plantation des végétaux et phase de démarrage des FPV

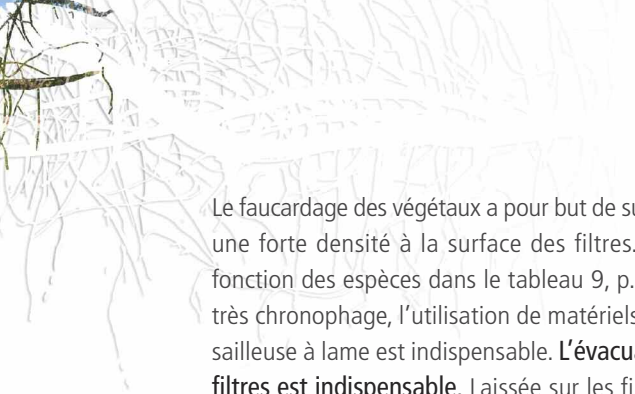
Les végétaux sont plantés selon une densité comprise entre 4 et 8 plants/m², en fonction de la vitesse de croissance de l'espèce choisie (Tableau 9) et de la charge attendue au démarrage de la station. Les plants sont mis en place avec leur motte, ce qui facilite leur reprise. Une couche de compost peut être ajoutée lorsque l'on soupçonne un démarrage à très faible charge. Elle jouera le rôle d'un paillage auprès des jeunes plants, maintenant une bonne humidité au sol et améliorant la répartition des eaux à la surface des filtres. En fonction de la qualité du compost, ce dernier peut relarguer quelques MES, voire même colorer légèrement les eaux (acides humiques). Ces effets sont temporaires mais il est d'importance de mettre en œuvre un compost ne comportant pas trop de fines ; un tamisage pour prendre la fraction supérieure à 1 mm est l'idéal. Au cours des premiers suivis sur Taupinière, où les végétaux avaient été mis en place avec du compost, des relargages non négligeable de DCO ont été observés. Cela a duré quelques mois seulement. Dans le cas d'un décalage entre la plantation et la mise en route de la station, il est nécessaire d'arroser régulièrement les végétaux pour favoriser leur croissance.

La phase de démarrage est une période pendant laquelle le suivi du développement végétatif doit être rigoureux. Si la station est sous-chargée, les végétaux peuvent avoir du mal à se développer. En cas de stress hydrique, il faut maintenir un arrosage avec des eaux claires (recirculation possible), ou, dans le cas d'une filière NS/S, augmenter au maximum le niveau de saturation. L'alternance des filtres à une fréquence de 3,5 jours d'alimentation puis de repos est toujours nécessaire. Dans le cas d'une station démarrant près de sa charge nominale, le rôle mécanique des végétaux n'étant pas encore effectif, un flaquage du filtre est possible. Il conviendra de s'assurer qu'il ne devienne pas trop problématique : il ne doit pas y avoir d'eau à la surface des filtres lors des phases de repos. Si c'est le cas, scarifier le dépôt de boues facilitera l'infiltration des eaux.

Dans tous les cas, des travaux d'arrachage des adventices doivent être mis en place une fois par mois minimum tant que les végétaux plantés n'ont pas colonisé densément l'ensemble des filtres. À partir d'une densité de 100 tiges au m², il n'est plus nécessaire d'intervenir, à moins que des plantes invasives n'apparaissent et prennent petit à petit le dessus sur les espèces plantées. Il existe dans chaque DOM, des espèces indésirables rampantes ayant la fâcheuse tendance à « coucher » les végétaux en place, ultime étape à éviter absolument.

5.2.2 Fonctionnement normal

Pendant la phase de fonctionnement normal, les filtres sont alimentés en alternance selon la fréquence 3,5 j/3,5 j. L'entretien normal des filtres se met alors en place. Les abords sont nettoyés tous les 2 mois et les mauvaises herbes à l'intérieur des filtres sont arrachées plus régulièrement, en fonction des besoins.



Le faucardage des végétaux a pour but de supprimer tous les végétaux morts et de maintenir une forte densité à la surface des filtres. Des fréquences indicatives sont données en fonction des espèces dans le tableau 9, p. 51. Le faucardage est une tâche qui peut être très chronophage, l'utilisation de matériels professionnels de type taille-haie ou débroussailluse à lame est indispensable. **L'évacuation de la biomasse végétale produite sur les filtres est indispensable.** Laissée sur les filtres, celle-ci peut être très lente à se dégrader et peut entraîner un colmatage de surface. Une fois que les plantes ont repoussé, il est très compliqué d'intervenir. Pour cette raison, certains exploitants préfèrent intervenir avec une machette et couper les plantes une à une en les retirant au fur et à mesure, plutôt que de tout broyer et se retrouver avec une masse de végétaux compliquée à extraire.

Le faucardage est une tâche d'exploitation normale et ne nécessite pas d'adaptation du mode de fonctionnement de la station. La repousse des végétaux se fait en quelques semaines.

5.2.3 Fonctionnement dégradé

Le fonctionnement dégradé correspond au fonctionnement minimal de la station suite à une avarie (panne, coupure de courant...). Il a normalement été prévu lors de la conception de la station.

Les FPV peuvent fonctionner entièrement en gravitaire, si la topographie le permet, avec des vannes manuelles, ce qui les met à l'abri de gros dysfonctionnements. Si un poste de relevage est indispensable, il doit être placé en tête de station de manière à ce que rien ne vienne entraver l'écoulement des eaux dans la station en cas de panne. En fonctionnement dégradé, les performances sur la fraction carbonée (DCO, DBO5, MES) sont maintenues mais celles concernant l'azote peuvent être affectées.

5.2.4 Curage des boues

Lorsque le dépôt organique atteint 20 cm d'accumulation, la conductivité hydraulique des filtres diminue, entraînant une diminution des échanges gazeux. Il est nécessaire de procéder au curage de la couche de dépôt. Ces boues sont fortement minéralisées et sont donc stabilisées (non fermentescibles). Le groupe de travail Epnac a produit un guide pour le prélèvement, l'échantillonnage et l'analyse des boues de FPV en vue de leur valorisation par épandage agricole (2014). Il détaille les différentes tâches à réaliser.

Si le système d'alimentation est aérien, il doit être démonté avant l'intervention des engins. Le curage peut être réalisé par un tractopelle équipé d'un godet de curage de fossé avec une lame relativement tranchante (sans dents). Les engins n'ont accès qu'à la périphérie des filtres : en effet leur entrée sur le filtre lui-même entraînerait un compactage et une détérioration du système, en particulier du réseau d'aération-drainage. Un chemin d'accès à la périphérie des filtres doit être prévu en conséquence.

Les plantes doivent être faucardées avant la phase de curage. La repousse des végétaux se fait directement depuis les rhizomes qui sont contenus dans la couche de boue résiduelle et dans les premiers centimètres du massif filtrant. C'est pour cette raison que les plantes choisies sont des plantes rhizomateuses.

À l'exception d'opérations curatives suite aux problèmes d'intrusion de matières minérales dans les réseaux (voir 5.1.1 et 5.1.3), il n'a jamais été réalisé de curage des boues sur les FPV dans les DOM. Ces éléments proviennent de l'expérience de la métropole. En dehors de la vitesse d'accumulation des boues qui reste à déterminer pour la zone tropicale, il n'y a pas *a priori* de différence avec les conditions métropolitaines, les mêmes préconisations pouvant s'appliquer.

Indice de Protection IP68

L'indice de protection (IP68) est un standard international de la Commission électrotechnique internationale relatif à l'étanchéité.

Cet indice classe le niveau de protection qu'offre un matériel aux intrusions de corps solides et liquides (sable, poussière, petits animaux et insectes volants ou rampants, eau et autres liquides, impacts mécaniques et gaz corrosifs de l'environnement). Le format de l'indice, donné par la norme CEI 60529, est IP68, le chiffre 6 indique que le matériel est totalement protégé contre la poussière tandis que le 8 indique que le matériel est submersible au-delà de 1 m.

5.2.5 Colmatage irréversible

Le système des FPV tend naturellement à se colmater. Les différentes tâches d'exploitation et de gestion des ouvrages permettent de retarder cette échéance. Des accidents (arrivée de matières minérales dans le réseau), une mauvaise qualité de matériaux (proportion de fines minérales > 3 %) ou une mauvaise exploitation (alternance non respectée) ont tendance à l'inverse à l'accélérer.

À l'heure actuelle, le plus vieux FPV de métropole a plus de 30 ans et n'a été curé que deux fois...

5.3 Gestion des ouvrages dans la zone tropicale

Un guide d'exploitation des filtres plantés est disponible sur le site Epnac. Il n'est pas spécifique à la zone tropicale. En complément, des retours d'exploitants dans les DOM sont compilés ici. Les spécificités de l'exploitation des FPV en zone tropicale concernent principalement la protection du matériel électromécanique et l'entretien des végétaux.

5.3.1. Tropicalisation des installations

Dans le cadre de la construction et de l'exploitation de FPV en zone tropicale, le choix des matériaux et matériels doit être adapté au mieux aux conditions climatiques difficiles. La chaleur, l'ensoleillement et l'humidité sont autant de facteurs qui peuvent réduire la durée de vie des appareils. Dans ce cadre-là, les appareils de mesures, de surveillance et de contrôle doivent être IP68 (tropicalisés de manière suffisante). On peut également rajouter des protections supplémentaires afin d'augmenter la durée de vie des appareils. Quelques exemples :

- protection solaire pour les débitmètres, les câbles des électrovannes, les appareils de mesure extérieurs, les boîtiers de commande, etc. (Figure 30A). Les électrovannes, les réducteurs de pression et les câbles d'alimentation sont les pièces qui seront changées le plus souvent. Les électrovannes en particulier ont posé de sérieux problèmes d'exploitation. Sur les trois années du projet Attentive, ces dernières ont fait l'objet d'interventions tous les 6 mois en moyenne. L'instabilité de pression dans le réseau d'alimentation en eau potable est la principale source de problème identifiée ;
- la mise en place d'aération est également conseillée pour tout espace fermé : armoire de commande, local technique... (Figure 30 B).

© Corram assainissement



Figure 30. A) Protection des électrovannes contre le rayonnement solaire. B) Aération sur une armoire électrique.

5.3.2. Entretien des végétaux

■ L'intérieur des filtres

Les besoins en entretien de l'intérieur des filtres sont dépendants de l'espèce végétale choisie (Tableau 9, p. 51). Les tâches d'exploitation liées à l'entretien de l'intérieur des filtres sont décrites ci-après.

■ Après la plantation ou suite à un curage : limiter le développement des plantes adventices par un arrachage manuel sélectif. La fréquence varie entre une fois par semaine et une fois par mois en fonction du type de plante, de l'âge du système... À partir d'une densité proche d'une centaine de tiges par m², cet accompagnement n'est plus nécessaire, les plantes sélectionnées sont suffisamment compétitives pour s'établir par elles-mêmes.

■ À chaque passage sur la station, l'exploitant contrôle visuellement l'état de la végétation sur les filtres. Le développement de plantes adventices qui prennent petit à petit le dessus sur le végétal en place doit être stoppé rapidement par un arrachage manuel.

■ Il est préconisé de réaliser un faucardage annuel avant la saison cyclonique quel que soit le végétal utilisé. Certaines espèces nécessitent un second passage dans l'année. L'utilisation de matériel adapté (type taille-haie plutôt que cisailles) permet de diviser le temps de travail par deux. Les plantes sont coupées à une quinzaine de centimètres au-dessus de la couche de boues. La biomasse végétale doit impérativement être exportée hors du filtre plutôt que laissée en décomposition à la surface des filtres où elle peut provoquer un colmatage de surface. Certains exploitants faucardent les *Heliconia* à la machette en réalisant de grosses brassées. Ils gagnent ainsi du temps sur la phase de ramassage de la biomasse à la surface des filtres.

L'entretien de l'intérieur des filtres est primordial pour la pérennité du système. C'est une tâche d'exploitation qui peut dérouter les opérateurs qui ont l'habitude des ouvrages conventionnels. L'entretien d'un filtre nécessite de comprendre le rôle des végétaux et leur développement. Certaines tâches comme le faucardage peuvent être fastidieuses si le matériel n'est pas adapté. **Il est fortement déconseillé de faire appel à un prestataire de services pour l'entretien de l'intérieur des filtres, c'est une tâche d'exploitation.**

■ Les abords de la station

L'entretien de la végétation de l'ensemble de la station doit se faire régulièrement (une fois par mois environ) afin de ne pas se laisser dépasser : tonte des espaces verts, entretien des arbres et évacuation des déchets verts vers une filière agréée.

L'entretien des abords concerne les voies d'accès et la clôture mais aussi les digues et accotements présents sur le site. Une attention particulière doit être portée sur les digues qui protègent les filtres et évitent l'entrée d'eau de ruissellement dans ces derniers.

Les adventices les plus coriaces à éliminer des filtres arrivent bien souvent depuis l'extérieur des filtres. L'entretien des abords participe donc à la prévention des problèmes de colonisation des filtres par les mauvaises herbes.

5.3.3. Synthèse des tâches à effectuer

Tableau 11. Synthèse des tâches à effectuer dans le cadre de l'exploitation de filtres plantés de végétaux (FPV) de 100 et 800 EH (Données Cotram)

Liste des opérations	Fréquence	FPV 100 EH		FPV 800 EH	
		Durée de l'opération (min)	Total/an (heures)	Durée de l'opération (min)	Total/an (heures)
Contrôle des chasses à auget, manœuvre des vannes	2 fois/semaine	5	8	5	8
Nettoyage du dégrilleur	1 fois/semaine	10	8	10	8
Contrôle et entretien des filtres, arrachage des mauvaises herbes manuellement	1 fois/semaine	60	48	180	144
Compléter le cahier de vie de la station	1 fois/semaine	15	12	15	12
Entretien des espaces verts autour des filtres	1 fois/mois	60	12	180	36
Nettoyage des regards et chasses à auget	1 fois/mois	60	12	90	18
Vidange et inspection des réseaux d'alimentation du premier (et second étage)	2 fois/an	60	2	150	5
Vérifier la hauteur des boues, l'état des géomembranes	1 fois/an	30	0,5	60	1
Faucardage et évacuation des végétaux	1 fois/an*	240	4	960	16
Extraction des boues du premier étage	1 fois/10 ans	960	1,5	1440	2,5
Total annuel des heures			108		250,5

*En fonction des espèces (partie 4.2 p. 50).

5.3.4. Retours d'expériences de la Guyane

Etiage Guyane suit ou exploite à ce jour sept filtres plantés et ce depuis 2010 pour le plus ancien. La principale tâche d'exploitation est l'entretien des végétaux dans les filtres. Après plusieurs années de suivi, le constat est sans équivoque : les filtres plantés constitués en déblai-remblai avec étanchéité par géomembrane présentent beaucoup plus de contraintes d'entretien que les FPV aménagés en caissons bétonnés, beaucoup moins sensibles à l'apparition et l'envahissement des adventices. Le faucardage est conseillé en fin de saison sèche en Guyane. Un deuxième faucardage (voire partiel) peut s'avérer nécessaire en fin de saison des pluies selon son intensité et la tendance des végétaux à verser sous le poids de l'eau.



Figure 31. Intégration paysagère d'un FPV dans un lotissement en Guyane.

Etiage Guyane préconise une surveillance des postes de relevage par télégestion ou une fréquence de passage minimale hebdomadaire. Pour les FPV de petite taille (< 100 EH), une alternance des filtres par vannes manuelles sera privilégiée afin de garantir le passage d'un exploitant.

Pas ou très peu de reptiles ont été observés sur les FPV. Les équipements de protection individuels (EPI)* nécessaires concernent plutôt les fournis parfois agressives lors des opérations de désherbage ou faucardage (bottes et gants indispensables lors de l'accès aux filtres).

Les filtres plantés ne génèrent pas du tout d'odeur. Ils sont très appréciés par les habitants même au pied des immeubles car très fleuris (dans le cas des *Heliconia psittacorum*) et parfois même confondus avec des jardins de promenade (Figure 31).

5.4 Autosurveillance réglementaire

L'autosurveillance a pour objectif de vérifier et de maintenir les performances des systèmes de traitement. Elle est encadrée sur le plan juridique par l'arrêté du 21 juillet 2015. Cette partie en présente une synthèse, qui s'appuie également sur le « commentaire technique de l'arrêté », pour les systèmes d'assainissement de capacité inférieure à 10 000 EH.

L'autosurveillance réglementaire est de la responsabilité du maître d'ouvrage. Elle concerne l'ensemble du système d'assainissement, c'est-à-dire à la fois le réseau de collecte et la station de traitement des eaux usées (STEU). Dans le cas où plusieurs maîtres d'ouvrage sont impliqués sur le même système, c'est celui de la STEU qui est en charge de la coordination, de la synthèse et de la transmission des informations.

5.4.1 Production documentaire

L'autosurveillance réglementaire est construite autour de la production de deux documents qui synthétisent les résultats des campagnes d'autosurveillance, dont la fréquence dépend de la capacité des stations.

Le premier document présente les caractéristiques du système et l'organisation de l'autosurveillance. Il s'agit du « cahier de vie » lorsque la capacité de traitement est inférieure à 2 000 EH, et du « manuel d'autosurveillance du système d'assainissement » au-delà.

Le second document est le « bilan de fonctionnement du système d'assainissement » qui synthétise les résultats de l'autosurveillance.

Des modèles de ces documents sont disponibles sur le portail de l'assainissement communal du ministère⁴.

4- Disponible sur le portail de l'assainissement communal du ministère : <http://assainissement.developpement-durable.gouv.fr/services.php> (consulté le 14/06/2017).

■ Cahier de vie (< 2 000 EH)

Le ou les maîtres d'ouvrage des systèmes de collecte et des stations de traitement concernés rédigent et tiennent à jour un cahier de vie. Le cahier de vie, compartimenté en trois sections, comprend *a minima* les éléments qui suivent.

1. Description, exploitation et gestion du système d'assainissement :

- 1.1. Un plan et une description du système d'assainissement, comprenant notamment la liste des raccordements non domestiques sur le système de collecte ;
- 1.2. Un programme d'exploitation sur dix ans du système d'assainissement ;
- 1.3. L'organisation interne du ou des gestionnaires du système d'assainissement.

2. Organisation de la surveillance du système d'assainissement :

- 2.1. Les modalités de mise en place de l'autosurveillance ;
- 2.2. Les règles de transmission des données d'autosurveillance ;
- 2.3. La liste des points équipés ou aménagés pour l'autosurveillance et le matériel utilisé ;
- 2.4. Les méthodes utilisées pour le suivi ponctuel régulier ;
- 2.5. L'organisation interne du ou des gestionnaires du système d'assainissement.

3. Suivi du système d'assainissement :

- 3.1. L'ensemble des actes datés effectués sur le système d'assainissement ;
- 3.2. Les informations et résultats d'autosurveillance ;
- 3.3. Les résultats des mesures d'autosurveillance reçues dans le cadre des autorisations de déversement d'eaux usées non domestiques dans le système de collecte ;
- 3.4. La liste des événements majeurs survenus sur le système d'assainissement (panne, situation exceptionnelle...) ;

- 3.5. Une synthèse annuelle du fonctionnement du système d'assainissement ;
- 3.6. Une synthèse des alertes ;
- 3.7. Les documents justifiant de la destination des boues.

Le cahier de vie et ses éventuelles mises à jour sont transmis pour information à l'Office de l'eau et au Service de police de l'eau (SPE-DEAL).

■ Manuel d'autosurveillance du système d'assainissement ($\geq 2\,000$ EH)

Ce manuel est rédigé en vue de la réalisation de la surveillance des ouvrages d'assainissement et de la masse d'eau réceptrice des rejets. Le maître d'ouvrage y décrit de manière précise son organisation interne, ses méthodes d'exploitation, de contrôle et d'analyse, la localisation des points de mesure et de prélèvements, les modalités de transmission des données, les organismes extérieurs à qui il confie tout ou partie de la surveillance, la qualification des personnes associées à ce dispositif.

Le manuel spécifie :

1. Les normes ou méthodes de référence utilisées pour la mise en place et l'exploitation des équipements d'autosurveillance ;
2. Les mentions associées à la mise en œuvre du format informatique d'échange de données « SANDRE » ;
3. Les performances à atteindre en matière de collecte et de traitement fixées dans l'acte préfectoral relatif au système d'assainissement ;
4. Les ouvrages épuratoires et recense l'ensemble des déversoirs d'orage (nom, taille, localisation de l'ouvrage et du ou des points de rejet associés, nom du ou des milieux concernés par le rejet notamment).

Ce manuel est transmis à l'Office de l'eau qui réalise une expertise technique du manuel, qu'elle transmet au SPE pour validation. Le manuel est régulièrement mis à jour et tenu à disposition des services de l'État sur le site de la station.

■ Bilan de fonctionnement du système d'assainissement

Le ou les maîtres d'ouvrage du système d'assainissement rédigent en début d'année le bilan annuel de fonctionnement de l'année précédente. Ils le transmettent à l'Office de l'eau et au SPE avant le 1er mars de l'année en cours.

Pour les systèmes de capacités inférieures à 200 EH, il n'y a pas d'autosurveillance réglementaire. Entre 200 et 500 EH, le bilan est à fournir tous les 2 ans, ce qui correspond à la fréquence des bilans 24 heures d'autosurveillance. À partir de 500 EH, les bilans de fonctionnement doivent être produits tous les ans.

Ce bilan annuel est un document synthétique qui reprend l'ensemble des données collectées dans le cadre de l'autosurveillance réglementaire et qui sont détaillées dans les parties suivantes. Il comprend :

1. Un bilan des déversements et rejets au milieu naturel (date, fréquence, durée, volumes et, le cas échéant, flux de pollution déversés) ;
2. Les éléments relatifs à la gestion des déchets issus du système d'assainissement (déchets issus du curage de réseau, sables, graisses, refus de dégrillage, boues produites...) ;
3. Les informations relatives à la quantité et la gestion d'éventuels apports extérieurs (quantité, qualité) : matières de vidange, boues exogènes, lixiviats*, effluents industriels, etc. ;
4. La consommation d'énergie et de réactifs ;
5. Un récapitulatif des événements majeurs survenus sur la station (opérations d'entretien, pannes, situations inhabituelles...) ;

6. Une synthèse annuelle des résultats des bilans 24 heures d'autosurveillance de l'année précédente ;
7. Un bilan des contrôles des équipements d'autosurveillance réalisés par le maître d'ouvrage ;
8. Un bilan des nouvelles autorisations de déversement dans le système de collecte délivrées durant l'année concernée et du suivi des autorisations en vigueur ;
9. Les éléments du diagnostic du système d'assainissement (il doit être réalisé tous les 10 ans, voir article 12 arrêté du 21 juillet 2015) ;
10. Une analyse critique du fonctionnement du système d'assainissement ;
11. Une autoévaluation des performances du système d'assainissement au regard des exigences de l'arrêté du 21 juillet 2015 ;
12. La liste des travaux envisagés dans le futur, ainsi que leur période de réalisation lorsqu'elle est connue.

Le programme annuel d'autosurveillance doit être organisé autour d'un calendrier prévisionnel de réalisation des mesures, qui doit être représentatif des particularités de l'agglomération d'assainissement (activités saisonnières). Le maître d'ouvrage doit l'adresser avant le 1er décembre de l'année précédente au SPE et à l'Office de l'eau.

Le maître d'ouvrage transmet à ces mêmes services les résultats de l'autosurveillance au cours du mois suivant leur production. La transmission se fait par voie électronique conformément au scénario d'échange des données en vigueur, défini par le Service d'administration nationale des données et référentiels sur l'eau (SANDRE).

En cas de dépassement des valeurs limites définies par l'arrêté du 21 juillet 2015 ou par le préfet, le service en charge du contrôle doit être immédiatement informé. Le maître d'ouvrage fournit des commentaires sur les causes des dépassements ainsi que sur les actions correctives mises en place ou envisagées.

5.4.2 Métrologie et réalisation de l'autosurveillance

La fréquence de l'autosurveillance est rappelée dans les tableaux 12 et 13.

■ Mesure des débits

Tableau 12. Fréquence et mode de mesure des débits dans le cadre de l'autosurveillance réglementaire (arrêté du 21 juillet 2015).

STEU	Obligations
< 500 EH	Estimations du débit en entrée ou en sortie du traitement
≥ 500 et < 2 000 EH	Mesures des débits en entrée ou en sortie du traitement
≥ 2 000 EH	Mesures et enregistrement des débits à l'entrée et à la sortie du traitement

■ Paramètres de qualité des eaux et fréquence de l'autosurveillance

Les bilans 24 heures réalisés dans le cadre de l'autosurveillance portent sur les paramètres suivants : pH, débits, T°, MES, DBO₅, DCO, et selon les niveaux de rejet à atteindre NH₄, NTK, NO₂, NO₃, Ptot. Les analyses des échantillons doivent être réalisées par un laboratoire agréé au titre du code de l'environnement (à l'exception des mesures sur les débits, T° et pH).

Tableau 13. *Fréquence et paramètres de qualité des eaux à analyser dans le cadre de l'auto-surveillance réglementaire (arrêté du 21 juillet 2015).*

Capacité	Fréquence d'autosurveillance
< 200 EH	Aucune obligation
≥ 200 et < 500 EH	1 tous les 2 ans
≥ 500 et < 1 000 EH	1 par an
≥ 1 000 et < 2 000 EH	2 par an
≥ 2 000 et < 10 000EH	Quotidien : débits Mensuel : pH, MES, DBO5, DCO 4 par an : NTK, NH ₄ , NO ₂ , NO ₃ , Ptot

La nuance entre estimation et mesure des débits est explicitée dans les commentaires techniques de l'arrêté du 21 juillet 2015, partie 2 : autosurveillance des systèmes d'assainissement collectifs. Une mesure correspond à un dispositif normalisé dont l'installation est vérifiée. À l'échelle des petites collectivités, il s'agit de :

- débitmètre électromagnétique installé sur des canalisations, selon les préconisations du constructeur et convenablement étalonné ;
- débitmètre bulle à bulle ou à ultrasons, associé à un canal jaugeur avec ou sans seuil (type venturi), convenablement installé et entretenu.

Le temps de fonctionnement des pompes d'un PR, associé à un tarage des pompes, ne donne qu'une estimation du débit. En effet, le débit de la pompe variant avec la charge sur la pompe, il faut coupler cette estimation avec la mesure d'une hauteur d'eau pour passer d'une estimation à une mesure. De même, un compteur mécanique de bâchées, associé au volume de chaque bâchée, donne une estimation des débits et non pas une mesure au sens de la réglementation.

Les départements d'outre-mer sont porteurs d'enjeux d'assainissement particulièrement sensibles. Soumis au même cadre réglementaire que la métropole (DCE, DERU), ils présentent un important retard dans la mise en place de systèmes d'assainissement performants alors que les enjeux environnementaux (concentration de la majorité de la biodiversité nationale), sanitaires, économiques, fonciers et sociaux nécessitent un développement rapide de l'assainissement.

Une des problématiques majeures provient d'une mauvaise adéquation des technologies et de leur adaptation au contexte particulier des DOM. Ce guide de dimensionnement des filtres plantés de végétaux en zone tropicale fait le point sur dix années de recherches menées à travers les cinq DOM visant à adapter une technologie largement éprouvée en climat tempéré. Les enseignements tirés se basent sur des suivis poussés, réalisés sur sept stations différentes ainsi qu'une étude spécifique sur le choix des végétaux.

Ces recherches ont permis de construire et de valider des règles de dimensionnement adaptées au contexte tropical. Ces dernières garantissent un équilibre entre l'efficacité et la robustesse de la filière, qui ont fait son succès en métropole, et un gain de compacité permis par les températures moyennes plus élevées en zone tropicale. Une attention particulière a été portée sur l'acceptation des temps de pluie, qui est une des faiblesses des procédés conventionnels à culture libre en contexte tropical. Des actions sont encore en cours, qui peuvent faire évoluer les préconisations de ce guide, aussi bien sur le choix des végétaux que de l'optimisation de la filière.

Au cours des suivis, aucun dépassement des niveaux de rejet imposés n'a été constaté. La configuration la plus simple garantit des performances au-delà du minimum réglementaire (75 %, 80 %, 80 % et 60 % d'abattement respectivement pour DCO, DBO5, MES et NTK avec des concentrations de sortie inférieures à 125 mg DCO/L). En fonction des besoins et des contraintes, les FPV peuvent être adaptés pour garantir un traitement du carbone supérieur à 95 %, une nitrification totale ou un traitement de l'azote total de 70 %.

Les filtres plantés à écoulement vertical présentés ici sont alimentés avec des eaux brutes. Ils permettent un traitement conjoint des eaux usées et des boues. Ils apportent donc également une solution au problème des sous-produits d'épuration dont la gestion est problématique dans les DOM.

La compacité de la filière tropicale permet à la fois de venir concurrencer les procédés conventionnels quand le foncier disponible est limité, mais aussi d'être compétitif au-delà de la capacité économique limite définie en métropole (5 000 EH). La plage d'utilisation des FPV est donc très large, de l'ouvrage semi-collectif pour des lotissements ou des bourgs isolés, aux centres urbains de taille moyenne.

Une des clés du succès des filtres plantés en métropole est la simplicité d'exploitation des ouvrages. Avec peu, voire pas de matériel électromécanique et donc pas d'électricité si la topographie le permet, les tâches de l'exploitant sont simples et les risques de panne faibles. L'entretien des végétaux est plus contraignant en zone tropicale et constitue la principale tâche de l'exploitant.

Les préconisations de ce guide, construit dans le cadre de recherches dans le contexte de l'outre-mer français, peuvent être utilisées dans l'ensemble de la zone tropicale.

Anti-affouillement	Qui protège de la fouille (excavation sous l'action de l'arrivée des eaux)
Adventices	Plantes indésirables ou espèces végétales autres que celle sélectionnée.
Bâchée	Volume d'eau correspondant à une lame de 2,5 à 5 cm répartie sur l'ensemble de la surface du filtre. Cette dernière est amenée sur le filtre avec un débit supérieur à la vitesse d'infiltration dans le massif, et provoque un flaquage, ce dernier garantissant une équirépartition des eaux usées à la surface et un renouvellement optimal de l'air contenu dans le massif.
Casier	Subdivision d'un filtre lors d'un partitionnement. En fonction du contexte il peut s'agir d'un seul des 2 filtres composant un étage de traitement.
Cultivar	Au sein d'une variété de plante, les cultivars sont obtenus en culture, après sélection pour une de leurs caractéristiques.
Exsudats racinaire	Liquides sécrétés par les racines des végétaux (défense, symbiose...).
Faucardage	Tâche d'exploitation des FPV consistant à couper les végétaux présents sur les filtres à une vingtaine de cm du sol et à exporter la biomasse ainsi produite.
File	Pour des grosses unités de traitement, il peut être plus intéressant de faire plusieurs petites unités fonctionnant en parallèle plutôt qu'une grosse. Dans ce cas-là une file correspond à une petite unité.
Flaquage	Colmatage temporaire à la surface des filtres se traduisant par l'apparition de flaques.
Latérite	Sol rouge ou brun, riche en oxydes de fer, se formant par altération des roches en climats tropicaux.
Lixiviat ou percolat	liquide résiduel provenant de la percolation de l'eau contenue (ou apportée par les pluies), à travers un matériau dont une partie est soluble.
Marcottage	Méthode de multiplication végétative des végétaux par hypogénèse (développement de racines) sur une partie aérienne de la plante mère.
Ultramarin	Relatif à l'outre-mer.
Verse	Accident de végétation provoqué par la pluie, le vent ou une attaque de parasites et couchant les parties aériennes de la plante au sol.

8

Sigles et abréviations

AFB	Agence française pour la biodiversité	MEDDE	Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie
ANC	Assainissement non collectif	MES	Matières en suspension
C	Carbone	N	Azote
CANGT	Communauté d'agglomération du Nord Grande Terre	NH₄	Ammonium
DBO₅	Demande biologique en oxygène à 5 jours	NO₂	Nitrite
DCE	Directive cadre sur l'eau	NO₃	Nitrate
DCO	Demande chimique en oxygène	NT	Azote total
DCof	Demande chimique en oxygène filtrée	NTK	Azote kjeldhal
DEAL	Direction de l'environnement de l'aménagement et du logement	NS/S	Non saturé/saturé
DERU	Directive relative aux eaux résiduaires urbaines	ODE	Office de l'eau
DOM	Département d'outre-mer	Onema	Office national de l'eau et des milieux aquatiques
EH	Équivalent-habitant	pH	Potentiel hydrogène
EHm	Équivalent-habitant mahorais	PP	Polypropylène
EPI	Équipement de protection individuel	PR	Poste de relevage
Epnac	Évaluation des procédés nouveaux d'assainissement pour les petites et moyennes collectivités	PT/Ptot	Phosphore total
Fredon	Fédération régionale de défense contre les organismes nuisibles	PVC	Polychlorure de vinyle
FPR	Filtre planté de roseaux	SANDRE	Service d'administration nationale des données et référentiels sur l'eau
FPV	Filtre planté de végétaux	SICSM	Syndicat intercommunal du centre et du sud de la Martinique
FPVv	Filtre planté de végétaux à écoulement vertical	SIEAM	Syndicat intercommunal d'eau et d'assainissement de Mayotte
FPVh	Filtre planté de végétaux à écoulement horizontal	STEU	Station de traitement des eaux usées
INSEE	Institut national de la statistique et des études économiques	SPE	Service police de l'eau
IP	Indice de protection	T°	Température
Irstea	Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture	UV	Ultra-Violet
H2S	Sulfure d'hydrogène		
LB	Lit bactérien		

Table des figures, des tableaux et des encadrés

9

Figures

- 9 **Figure 1.** Évolution du nombre de filtres plantés de végétaux (FPV) en métropole (A) et à Mayotte (B).
- 10 **Figure 2.** Coupe transversale schématique d'un FPV à écoulement vertical
- 11 **Figure 3.** Illustration du rôle mécanique des végétaux sur les lits de séchage de boues plantés de roseaux
- 11 **Figure 4.** Schéma de la filière tropicale
- 12 **Figure 5.** Schéma de la filière classique métropolitaine
- 13 **Figure 6.** Lame crénelée pour recirculation manuelle
- 13 **Figure 7.** Schéma d'un filtre vertical non saturé/saturé
- 14 **Figure 8.** Alimentation sur le 2^e étage de la station de Mansarde Rancée (Martinique) avant plantation, février 2014
- 15 **Figure 9.** Schéma d'un filtre à écoulement horizontal
- 16 **Figure 10.** Lit bactérien à faible charge en second étage.
- 17 **Figure 11.** Opération de curage des boues en Guyane sur Bois d'Opale 1
- 21 **Figure 12.** Distribution des charges hydrauliques appliquées sur les filtres de la station de Taupinière (Martinique) entre le 1/1/2015 et le 31/05/2017
- 22 **Figure 13.** Mise en charge des filtres de la station de Taupinière au cours de la tempête Matthew
- 22 **Figure 14.** Végétaux plantés sur les filtres en service de la station de Taupinière après le passage de la tempête Matthew
- 24 **Figure 15.** Dispersion des valeurs des échantillons en fonction des concentrations
- 25 **Figure 16.** Charges traitées en fonction des charges appliquées pour les paramètres DCO, MES et NTK, pour les deux types de procédés
- 26 **Figure 17.** Comparaison des performances des différentes configurations des FPV
- 34 **Figure 18.** Phasage d'un projet de FPV par partitionnement ou ajout d'une nouvelle file eau
- 35 **Figure 19.** Exemple de partitionnement sur la station de Taupinière (Martinique)
- 39 **Figure 20.** Cloison de séparation de deux filtres dans le même casier
- 41 **Figure 21.** Réseau d'alimentation aérien avec la plaque anti-affouillement (à gauche), ou enterré lors d'une bâchée (à droite)
- 41 **Figure 22.** Schéma des canalisations d'aération-drainage
- 47 **Figure 23.** Conclusions de l'étude sur l'ordre des Zingibérales
- 48 **Figure 24.** Filtre planté d'*Heliconia psittacorum*
- 49 **Figure 25.** Attaque de chenilles sur *Canna indica* sur la station des Mangles en Guadeloupe
- 49 **Figure 26.** Marcottage sur *Clinogyne comorensis*
- Figure 27.** Coulée de boue sur le FPV de Salazie à La Réunion
- 54 **Figure 28.** Colmatage du filtre de Bois d'Opale 1 par des latérites
- 54 **Figure 29.** Mort des *Thysanolaena maxima* au niveau des points d'alimentation, station de Mansarde Rancée (Martinique)
- 57 **Figure 30.** A) Protection des électrovannes contre le rayonnement solaire. B) Aération sur une armoire électrique
- 59 **Figure 31.** Intégration paysagère d'un FPV dans un lotissement en Guyane

Tableaux

- 19** **Tableau 1.** Présentation des différentes stations pilotes dans la zone tropicale
- 20** **Tableau 2.** Présentation des caractéristiques des eaux usées brutes par temps sec et temps de pluie, ainsi qu'avec les données des petites collectivités rurales métropolitaines (Mercoiret, 2010)
- 23** **Tableau 3.** Synthèse des analyses réalisées sur les échantillons entrée et sortie de filtre (1^{er} étage uniquement le cas échéant)
- 28** **Tableau 4.** Performances minimales de traitement attendues pour les paramètres DBO5, DCO et MES définies par l'arrêté du 21 juillet 2015
- 30** **Tableau 5.** Synthèse des informations présidant au choix des variantes de FPV à mettre en place
- 32** **Tableau 6.** Comparaison de l'EH métropolitain et tropical pour les petites collectivités (< 2 000 EH)
- 33** **Tableau 7.** Coefficients correcteurs pour l'évaluation de la capacité des petits ensembles collectifs, d'après la circulaire du 22 mai 1997
- 37** **Tableau 8.** Charges de dimensionnement sur le filtre en fonctionnement d'un filtre à écoulement vertical librement drainé de premier étage
- 51** **Tableau 9.** Présentation synthétique des espèces retenues pour les FPV dans les DOM
- 53** **Tableau 10.** Liste des documents à fournir et des essais à réaliser par le constructeur lors de la phase de démarrage de la station
- 59** **Tableau 11.** Synthèse des tâches à effectuer dans le cadre de l'exploitation de FPV de 100 et 800 EH
- 62** **Tableau 12.** Fréquence et mode de mesure des débits dans le cadre de l'autosurveillance réglementaire (arrêté du 21 juillet 2015)
- 63** **Tableau 13.** Fréquence et paramètres de qualité des eaux à analyser dans le cadre de l'autosurveillance réglementaire (arrêté du 21 juillet 2015)

Encadrés

- 4** FPR et FPV
- 8** Équivalent-habitant (EH)
- 12** La filière classique métropolitaine
- 13** Calcul du taux de recirculation
- 18** Autotrophes et hétérotrophes
- 19** Prélèvements par les végétaux
- 20** Charge hydraulique nominale appliquée sur le filtre en fonctionnement
- 27** Traitement du phosphore
- 37** Exemples de dimensionnement
- 47** Cycle végétatif
- 57** Indice de protection IP68

- AFNOR. Station d'épuration. Partie 1 : Principes généraux de construction. Norme française NF EN 12255-1, Avril 2002 : indice de classement P 16-700-1. 18 p.
- AFNOR. Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats – Partie 1 : détermination de la résistance à l'usure (micro-Deval). Norme française NF EN 1097-1, Août 2011, indice de classement P18-650-1. 14 p.
- AFNOR. Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats – Partie 2 : méthode pour la détermination de la résistance à la fragmentation. Norme française NF EN 1097-2, 2 juin 2010, indice de classement P18-650-2. 32 p.
- Arias Lopez, José Luis. Vertical-flow constructed wetlands for the treatment of wastewater and stormwater from combined sewer systems. Thèse de doctorat en génie civil. Lyon : INSA, 2013, 234 p. Disponible sur : <http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0102/these.pdf> (consulté le 25/07/2017).
- Choubert, J-M., Martin-Ruel, S., Budzinsky, H., Miège, C., Esperanza, M., Soulier, C., Lagarrigue, C., Coquery, M. « Évaluer les rendements des stations d'épuration. Apports méthodologiques et résultats pour les micropolluants en filières conventionnelles et avancées », Techniques Sciences Méthodes, 2011, vol. 1/2, pp. 44-62.
- Comité Français des Géosynthétiques. Recommandations générales pour la réalisation d'étanchéités par géomembranes. Edition 2017. Rueil-Malmaison : Comité français des géosynthétiques, 2017, 81 p. Disponible sur : <http://www.cfg.asso.fr/publications/guides-de-recommandations/n10-recommandations-generales-realisation-etancheite-par-geomembranes> (consulté le 25/05/2017).
- Conseil des Communautés Européennes. Directive du conseil du 21 mai 1991 relative au traitement des eaux urbaines résiduaires (91/271/CEE). Journal officiel n° L 135 du 30/05/1991, pp. 0040–0052.
- Conservatoire botanique national de Mascarin (Boullet V. coord.) 2011. Index de la flore vasculaire de Mayotte (Trachéophytes) : statuts, menaces et protections. Version 2011.1 (mise à jour du 01 août 2011).
- Conservatoire botanique national de Mascarin, Antenne de Mayotte - Coconi - Disponible sur <http://floremaore.cbnm.org> (consulté le 17/12/2016).
- Conservatoire botanique national de Mascarin (Boullet V. coord. et auteur principal) version 2012 - Index de la flore vasculaire de la Réunion (Trachéophytes) : statuts, menaces et protections. Disponible sur <http://floremaore.cbnm.org> (consulté le 17/12/2016).
- Dotro, G., Langergraber, G., Molle, P., Nivala, J., Puigagut, J., Stein, O., von Sperling, M. « Treatment wetlands. Biological Wastewater Treatment Series », Treatment Wetlands, vol 7: IWA publishing, 2017, 184 p. Disponible sur : <https://www.iwapublishing.com/books/9781780408767/treatment-wetlands>.
- Eme, C. Traitement des eaux usées domestiques par filtres plantés de macrophytes. Adaptation de la filière au contexte tropical : état de l'art. Rapport de recherche Irstea Lyon-Villeurbanne. Paris : Onema, 2012, 76 p. Disponible sur : https://epnac.irstea.fr/wp-content/uploads/2016/10/DOM_Ttt-eaux-us%C3%A9es-par-FP-macrophytes_C.Eme_.pdf (Consulté le 25/07/2017).

- Epnac. Eléments de méthode pour la définition des niveaux de rejets du petit collectif. Guide technique atelier de travail du groupe Evaluation des procédés nouveaux d'assainissement des petites et moyennes collectivités. Paris : Onema, 2016, 53 p. Disponible sur : https://epnac.irstea.fr/wp-content/uploads/2016/05/Element-de-methode-pour-la-definition-des-niveaux-de-rejet-du-petit-collectif_vf.pdf (Consulté le 25/05/2017).
- Epnac. Guide d'exploitation de la filière Filtres Plantés de Roseaux. Guide technique atelier de travail du groupe Évaluation des procédés nouveaux d'assainissement des petites et moyennes collectivités. Paris : Onema, 2014, 30 p. Disponible sur : https://epnac.irstea.fr/wp-content/uploads/2012/08/Guide-exploitation-FPR_EPNAC_2014.pdf (Consulté le 25/05/2017).
- Epnac. Le véritable rôle des végétaux dans le traitement des eaux usées. Paris : Onema, 2014, 4 p. Disponible sur : <https://epnac.irstea.fr/role-des-vegetaux-dans-l-assainissement/> (Consulté le 14/09/2017).
- Epnac. Protocole de prélèvement, d'échantillonnage et d'analyse des boues de FPR en vue de leur valorisation par épandage agricole. Guide technique atelier de travail du groupe Évaluation des procédés nouveaux d'assainissement des petites et moyennes collectivités. Paris : Onema, 2014, 32 p. Disponible sur : https://epnac.irstea.fr/wp-content/uploads/2014/07/Onema-Irstea_Protocole-pr%C3%A9l%C3%A8vement-FPR_Final.pdf (Consulté le 25/05/2017).
- Fournet, J. Flore illustrée des phanérogames de Guadeloupe et de Martinique : Clefs générales "Cycadaceae-Avicenniaceae". Paris : CIRAD, Gondwana Éditions, 2002, vol. 1, 1324 p.
- Fournet, J. Flore illustrée des phanérogames de Guadeloupe et de Martinique : « Lamiaceae-Orchidaceae ». Paris : CIRAD, Gondwana Éditions, 2002, vol. 2, 1 213 p.
- Funk, V., Hollowell, T., Berry, P., Kelloff, C., Alexander, S.N. Checklist of the Plants of the Guiana Shield (Venezuela: Amazonas, Bolivar, Delta Amacuro; Guyana, Surinam, French Guiana). Contributions from the United States National Herbarium, 2007, vol. 55, 584 p.
- Gagnon, V., Chazarenc, F., Comeau, Y., Brisson, J. « Influence of macrophyte species on microbial density and activity in constructed wetlands », Water Science & Technology, 2007, vol.56 (3), pp. 249–254.
- Groupe macrophytes et traitement des eaux. Épuration des eaux usées par filtres plantés de macrophytes. Recommandations techniques pour la conception et la réalisation. Guide technique. Lyon : Agence de l'eau RMC, 2005, 45 p. Disponible sur : <https://epnac.irstea.fr/wp-content/uploads/2012/08/Guide-Macrophytes.pdf> (Consulté le 25/07/2017).
- Lombard Latune, R., Eme, C., Riegel, C., Molle, P. Suivi des stations expérimentales FPR à Mayotte. Bilan des campagnes de 2008 à 2013. Rapport de recherche Irstea Lyon-Villeurbanne. Paris : Onema, 2014, 52 p. Disponible sur : https://epnac.irstea.fr/wp-content/uploads/2016/10/DOM_Retour_exp_Mayotte_2014.pdf (Consulté le 25/07/2017).
- Lombard Latune, R., Lacombe, G., Molle, P. Retours d'expérience sur les premiers suivis expérimentaux des FPR en Guyane. Suivi des performances de Bois d'Opale 1 et 2. Rapport de recherche Irstea Lyon-Villeurbanne. Paris : Onema, 2014, 36 p. Disponible sur : https://epnac.irstea.fr/wp-content/uploads/2016/10/DOM_Retour_exp_Guyane_2014.pdf (Consulté le 25/07/2017).
- Lombard Latune, R., Laporte-Daube, O., Fina, N., Peyrat, S., Pelus, L., Molle, P. « Which plants are needed for a vertical-flow constructed wetland under tropical climate ? », Water Science & Technology, 2017, vol. 75 (8), pp. 1873-1881.
- Lombard Latune, R., Molle, P. Quelles plantes pour les filtres plantés de végétaux dans les DOM ? Rapport de recherche Irstea Lyon-Villeurbanne. Paris : Onema, 2016, 76 p. Disponible sur : https://epnac.irstea.fr/wp-content/uploads/2016/10/Rapport_plantes_FPV_DOM_2016.pdf (Consulté le 25/05/2017).

- Mercoiret, L. Qualité des eaux usées domestiques produites par les petites collectivités. Application aux agglomérations d'assainissement inférieures à 2 000 Équivalents-Habitants. Rapport scientifique. Paris : Onema, 2010, 55 p. Disponible sur : <https://epnac.irstea.fr/wp-content/uploads/2012/05/Qualit%C3%A9-des-eaux-us%C3%A9es-domestiques-produites-par-les-petites-collectivit%C3%A9s.pdf> (Consulté le 25/07/2017).
- Ministère de l'Écologie du Développement durable et de l'Énergie. Arrêté du 21 juillet 2015 relatif aux systèmes d'assainissement collectif et aux installations d'assainissement non collectif, à l'exception des installations d'assainissement non collectif recevant une charge brute de pollution organique inférieure ou égale à 1,2 kg/j de DBO5. JORF n°0190 du 19 août 2015 p. 14457 texte 2.
- Ministère de l'Équipement, du Logement, des Transports et du Tourisme. Circulaire du 22 mai 1997 relative à l'assainissement non collectif. Bulletin Officiel n°649-97 du 22 mai 1997 du ministère de l'Équipement, 16 p.
- Molle, P., Liénard, A., Boutin, C., Merlin, G., Iwema, A. « How to treat raw sewage with constructed wetlands: an overview of the French systems », *Water Science & Technology*, 2005, vol. 51 (9), pp. 11-21.
- Morvannou, A., Forquet, N., Michel, S., Troesh, S., Molle, P. « Treatment performances of French constructed wetlands : results from a database collected over the last 30 years », *Water Science & Technology*, 2015, vol. 71 (9), pp. 1333-1339.
- Morvannou, A., Troesch, S., Esser, D., Forquet, N., Petitjean, A., Molle, P. « Using one filter stage of unsaturated/saturated vertical flow filters for nitrogen removal and footprint reduction of constructed wetlands », *Water Science & Technology*, 2017, vol. 76 (1), pp. 124-133.
- Morin E., Dimastromatteo, N., Rakedjian, B. Application de la directive 91/271/CEE relative au traitement des eaux résiduaires urbaines, Guide de définitions à l'attention des services en charge de la police de l'eau pour le renseignement de la base de données ROSEAU. Paris : MEDDE, 2013, 119 p. Disponible sur : http://assainissement.developpement-durable.gouv.fr/documents/2013_06_G_def_ERU_version_2-0-1.pdf (Consulté le 25/07/2017).
- Petitjean, A., Wanko, A., Forquet, N., Mosé, R., Lawniczak, F., Sadowski, A. « Diphasic transfer of oxygen in vertical flow filter: A modelling approach », *Water Science & Technology*, 2011, vol. 64 (1) : pp. 109-116.
- Prost-Boucle, S., Molle, P. « Recirculation on a single stage of vertical flow constructed wetland: treatment limits and operation modes », *Ecological Engineering*, 2012, vol. 43, pp. 81-84.
- Pôle d'appui technique aux services déconcentrés du ministère de l'Agriculture. Cadre guide pour un cahier des clauses techniques particulières (CCTP), filtres plantés de roseaux. Paris : ministère de l'Agriculture et de la Pêche, avril 2007, 76 p. Disponible sur : https://epnac.irstea.fr/wp-content/uploads/2012/08/CadreguideCCTP_FPR1.pdf (consulté le 25/05/2017).
- Richez, N. Comment développer un assainissement durable dans les DOM ? État des lieux de l'assainissement des départements d'outre-mer et proposition d'actions pour le développer. Thèse professionnelle de Mastère d'action publique. Paris : École des Ponts, 2011, 102 p. Disponible sur : https://epnac.irstea.fr/wp-content/uploads/2016/10/DOM_Th%C3%A8se-NRichez-2011.pdf (consulté le 25/05/2017).

Citation

Lombard Latune R., Molle P., 2017. Les filtres plantés de végétaux pour le traitement des eaux usées domestiques en milieu tropical. Guide de dimensionnement de la filière tropicalisée. Agence française pour la biodiversité, collection *Guides et protocoles*, 72 pages

ISBN web-pdf : 978-2-37785-021-1

ISBN print : 978-2-37785-022-8

Édition

Véronique Barre, Béatrice Gentil-Salasc

Création et mises en forme graphiques

Béatrice Saurel

Impression

IME by Estimprim

© AFB, octobre 2017



À destination des maîtres d'ouvrages et maîtres d'œuvre, ce guide a été conçu comme un outil d'accompagnement pour la conception et la réalisation d'un projet de traitement des eaux usées par filtres plantés de végétaux (FPV). Les départements d'outre-mer (DOM) sont porteurs d'enjeux d'assainissement particulièrement sensibles. Une des problématiques majeures provient d'une mauvaise adéquation des technologies, au contexte particulier des tropiques. Les préconisations présentées ici, construites dans le cadre de recherches réalisées en outre-mer français, peuvent être utilisées dans l'ensemble de la zone tropicale.

Ce guide fait le point sur dix années de recherches menées à travers les cinq DOM visant à adapter une technologie largement éprouvée en climat tempéré. Les enseignements tirés se basent sur des suivis poussés, ainsi qu'une étude spécifique sur le choix des végétaux.

Ces recherches ont permis de construire et de valider des règles de dimensionnement adaptées au contexte tropical, dans un objectif de compacité tout en garantissant un équilibre entre l'efficacité et la robustesse de la filière de traitement. Ces travaux se sont focalisés sur les filtres plantés à écoulement vertical. Alimentés avec des eaux usées brutes, ils apportent une solution pertinente au problème de la gestion des boues, point sensible en contexte insulaire.

Une attention particulière a été portée sur l'acceptation des temps de pluie, une des faiblesses des procédés conventionnels en contexte tropical. Les suivis ont mis en évidence la fiabilité des FPV par rapport aux exigences réglementaires et au-delà : traitement poussé du carbone, nitrification totale, voire abattement de 70% de l'azote total.

La compacité de la filière tropicale permet à la fois de venir concurrencer les procédés conventionnels quand le foncier disponible est limité, mais aussi d'être compétitif dans le cas de centres urbains de taille moyenne.

Après une description des processus mis en jeu dans ces ouvrages et les performances des différents procédés étudiés, ce guide expose les différents aspects à prendre en compte dans l'élaboration d'un projet d'assainissement, c'est ainsi qu'il présente :

- les caractéristiques des eaux usées des petites collectivités des DOM ;
- un rappel des règles de détermination de niveau de rejet ;
- les choix technologiques au regard des contraintes locales et des éventuels phasages à réaliser ;
- les règles précises de dimensionnement et de conception des ouvrages ;
- les différentes espèces végétales qui peuvent être utilisées ;
- le détail des tâches d'exploitation et de surveillance à réaliser pour une gestion optimum des ouvrages.

AGENCE FRANÇAISE
POUR LA BIODIVERSITÉ
ÉTABLISSEMENT PUBLIC DE L'ÉTAT

