



**AGENCE FRANÇAISE
POUR LA BIODIVERSITÉ**
ÉTABLISSEMENT PUBLIC DE L'ÉTAT

Programme 2016/2018 – Thème Eau et aménagement urbain - Action n° AW

Etude du vieillissement des filtres plantés de roseaux

Rapport final

Nicolas FORQUET (Irstea)

Décembre 2019



- **AUTEURS**

Nicolas FORQUET, Ingénieur de recherche (Irstea), nicolas.forquet@irstea.fr

- **CORRESPONDANTS**

OFB : Stéphane GARNAUD-CORBEL, Chargé mission recherche, stephane.garnaud-corbel@ofb.gouv.fr (adresse mail à compter du 1^{er} janvier 2020)

Droits d'usage : accès libre

Niveau géographique : national

Couverture géographique : France

Niveau de lecture : professionnels

[



• RÉSUMÉ

Avec 4 620 installations recensées dans la base de données d'auto-surveillance, les filtres plantés de roseaux sont la technologie de traitement des eaux usées la plus répandue en milieu rural. L'objectif de cette étude est de faire un point sur les difficultés rencontrées dans la mise en œuvre de la filière avec un recul de près de 30 ans aujourd'hui, ainsi que sur les enjeux liés au vieillissement des installations et à leur besoin de réhabilitation ou de remplacement sachant que l'âge médian des stations filtre planté de roseaux est de 10 ans.

Le présent rapport décrit les mécanismes d'encrassement (réduction progressive de la porosité n'entraînant pas de dysfonctionnement) et de colmatage (réduction des capacités d'infiltration entraînant surverses et non-respect des normes de rejet), ainsi qu'une revue bibliographique sur l'état d'avancement des connaissances sur ces phénomènes. La revue bibliographique aborde également la question de la réhabilitation et des différentes techniques qui ont été testées à cet effet.

Les résultats d'une enquête réalisée auprès des SATESE sur les stations filtre planté de roseaux présentant des dysfonctionnements sont également présentés. Ces dysfonctionnements sont de l'ordre de la conception, de la gestion ou relatif à la nature de l'effluent d'entrée. Les problèmes de conception concernent principalement les drains et le système de distribution de l'effluent. Les problèmes de gestion se concentrent sur les végétaux et les tâches d'entretien qui y sont associées. En ce qui concerne l'effluent en entrée, différentes pistes ont été mise en évidence mais il ressort clairement que des épisodes de surcharges hydrauliques sur des périodes longues ont un effet délétère sur le fonctionnement des filtres plantés de roseaux. Une analyse des bilans 24 heures sur l'ensemble de la base de données dont dispose Irstea met en évidence que la charge hydraulique dépasse la charge recommandée dans plus de 25 % des stations.

Le colmatage n'affecte qu'un nombre réduit de station : 26 ont été répertoriées dans le cadre de cette étude, mais conduit à des situations très difficiles à gérer car les ouvrages de by-pass sont souvent absents. Il n'est pas rare qu'un problème de colmatage rencontré sur le premier étage se propage au second.

Des travaux de recherche sont donc nécessaires afin :

- de quantifier la vitesse d'encrassement des filtres plantés de roseaux et ainsi prévoir les besoins en terme de réhabilitation et de remplacement ;
- de mettre en place des outils préventifs et curatifs en cas de colmatage précoce, ainsi que des recommandations sur la gestion des surcharges hydrauliques longues et les aménagements constructifs à prévoir pour y faire face.

• MOTS CLÉS

filtre planté de roseaux, colmatage, encrassement



- **AGING OF FRENCH VERTICAL FLOW TREATMENT WETLANDS**

- **ABSTRACT**

There were 4,620 French Vertical Flow (VF) treatment wetlands of capacity larger than 200 people equivalents in operation in France in 2018. French VF treatment wetlands have become the most common treatment technology used in rural areas. The aim of this study is to get a snapshot of current difficulties associated to this technology and to highlight the challenges associated to a larger number of aging filters (the median age of French VF treatment wetlands is 10 years) and their forthcoming need of rehabilitation or replacement.

Fouling (porosity reduction that does not affect the functioning and efficiency of the treatment plant) and clogging (large reduction of infiltration capacity that leads to overflows and a non-respect of treatment regulations) mechanisms occurring within and on the top of French VF treatment wetlands are described along with a literature review on the current state of knowledge regarding these phenomena.

The results of a national survey on malfunctioning of French VF treatment wetlands are presented. The respondents are technicians of SATESE (regional organization in charge of supporting small communities in the management of their wastewater facilities) Malfunctioning have been classified in three categories depending on their source: design, management and influent. The major issues associated to treatment wetland design that were reported concern the drains and influent distribution system. Management issues are mainly associated to plants. Influent quality may affect treatment wetland functioning in different ways but it seems that hydraulic overloads are the most common issue French VF treatment wetlands are facing. An analysis of all available 24 hours average samples shows that more than 25% of the treatment plants have hydraulic loads that exceed 0.37 m.j^{-1} .

Clogging only affects a limited number of French VF treatment wetlands: 26 have been identified in this survey. However, when it occurs, clogging put operators in a very tricky situation as there are only few actions that can be taken that are either costly (dredging out the clogged layer) or harmful for the environment (by-pass of the entire treatment plant). Furthermore, if not dealt with adequately clogging may propagate from the first treatment stage to the second one.

Research actions are therefore necessary to: (i) quantify fouling dynamics to be able to forecast the forthcoming needs in terms of rehabilitation and replacement, and (ii) to develop predictive and curative tools to deal with early clogging as well as to release complementary recommendations on how to deal with hydraulic overloads that last more than a couple of days.

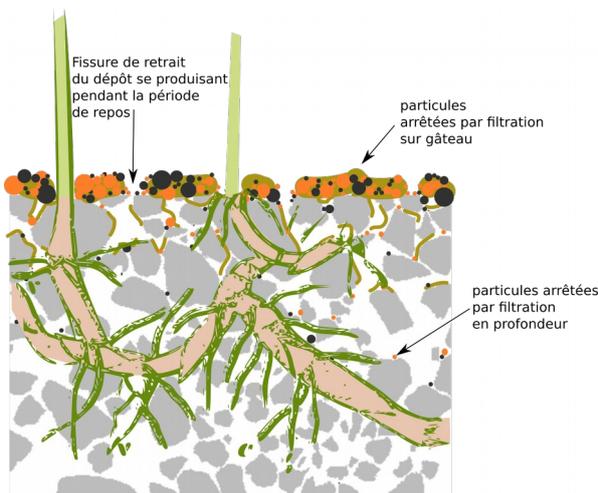
- **KEY WORDS**

French vertical flow treatment wetlands, clogging, fouling

• SYNTHÈSE POUR L'ACTION OPÉRATIONNELLE

Avec 4 620 installations recensées dans la base de données d'auto-surveillance, les filtres plantés de roseaux sont la technologie de traitement des eaux usées la plus répandue en milieu rural. L'objectif de cette étude est de faire un point sur les difficultés rencontrées dans la mise en œuvre de la filière avec un recul de près de 30 ans aujourd'hui, ainsi que sur les enjeux liés au vieillissement des installations et à leur besoin de réhabilitation ou de remplacement sachant que l'âge médian des stations filtre planté de roseaux est de 10 ans.

A la différence des boues activées, la filière intensive la plus couramment mise en œuvre en France, les boues issues de la sédimentation des matières en suspension (MES) et de l'activité biologique ne sont pas régulièrement extraites mais s'accumulent dans et à la surface du filtre où elles sont partiellement minéralisées. Dans cette étude, nous appelons « encrassement », la formation d'un dépôt dans et sur le filtre qui ne dégrade pas les performances et le bon fonctionnement hydraulique du système, et « colmatage » un phénomène d'encrassement trop rapide qui conduit à des dysfonctionnements hydrauliques entraînant des surverses ainsi qu'au non-respect des normes de rejet.



La formation du dépôt dans et sur le filtre est contrôlée par deux mécanismes : la filtration en profondeur et la filtration par gâteau. L'importance relative de ces deux phénomènes varie au cours de la vie du filtre. La période de repos joue également un rôle essentiel dans la structuration du dépôt.

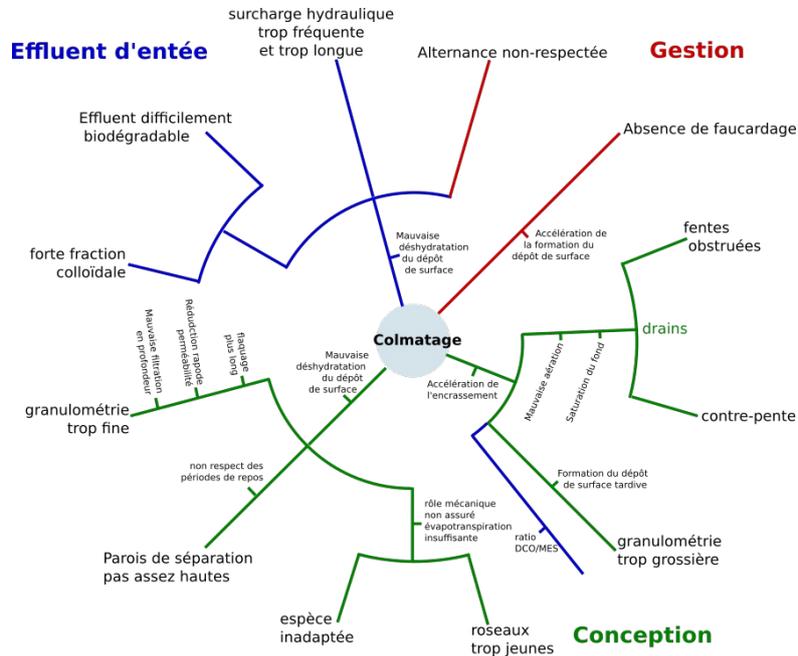
Dans le filtre, l'accumulation du dépôt conduit à la formation d'un réseau de micropores capables de retenir l'eau et de l'échanger avec un réseau de macropores drainant le massif filtrant.

En France, les filtres plantés de roseaux à écoulement vertical sont alimentés en eau usée brute alors qu'à l'étranger, comme en Allemagne par exemple, ils sont alimentés avec une eau pré-traitée et à des charges hydrauliques souvent bien inférieures. Néanmoins, beaucoup moins de cas de colmatage sont observés en France. Cela tient vraisemblablement à l'application de l'alternance mais également au recours du gravier comme matériau filtrant (pour le premier étage) à la place du sable usuellement utilisé ailleurs dans le monde.

Les résultats d'une enquête réalisée auprès des SATESE sur les stations filtre planté de roseaux présentant des dysfonctionnements sont également présentés. Ces dysfonctionnements sont de l'ordre de la conception, de la gestion ou relatif à la nature de l'effluent en entrée. Les problèmes de conception concernent principalement les drains et le système de distribution de l'effluent. Les problèmes de gestion se concentrent sur les végétaux et les tâches d'entretien qui y sont associées. En ce qui concerne l'effluent en entrée, différentes pistes ont été mise en évidence mais il ressort

clairement que des épisodes de surcharges hydrauliques sur des périodes longues ont un effet délétère sur le fonctionnement des filtres plantés de roseaux. Une analyse des bilans 24 heures sur l'ensemble de la base de données dont dispose Irstea met en évidence que la charge hydraulique dépasse la charge recommandée dans plus de 25 % des stations.

Le colmatage n'affecte qu'un nombre réduit de station : 26 ont été répertoriées dans le cadre de cette étude, mais conduit à des situations très difficiles à gérer car les ouvrages de by-pass sont souvent absents. Il n'est pas rare qu'un problème de colmatage rencontré sur le premier étage se propage au second. La figure ci-dessous propose un arbre des causes susceptibles d'expliquer le développement du colmatage à partir des catégories mentionnées précédemment.



Des travaux de recherche sont encore nécessaires afin :

- de quantifier la vitesse d'encrassement des filtres plantés de roseaux et ainsi prévoir les besoins en terme de réhabilitation et de remplacement ;
- de mettre en place des outils préventifs et curatifs en cas de colmatage précoce ainsi que des recommandations sur la gestion des surcharges hydrauliques longues et les aménagements constructifs à prévoir pour y faire face.

• **SOMMAIRE**

1. Introduction.....	9
2. Etat des lieux de la filière.....	9
3. Vieillissement des filtres plantés de roseaux : encrassement et colmatage.....	12
3.1. Modèle théorique de l'encrassement du 1 ^{er} étage d'un FPR.....	12
3.1.1. Formation du dépôt de surface et cycle alimentation/repos.....	13
3.1.2. Grands cycles d'accumulation de matière dans le 1^{er} étage des FPR.....	15
3.1.3. Où s'accumule la matière dans le filtre ?.....	16
3.1.4. Autres mécanismes essentiels de formation, de régulation et de structuration du dépôt.....	17
3.2. Que sait-on aujourd'hui des mécanismes de formation du colmatage ?.....	18
3.2.1. Méthodes utilisées.....	19
3.2.2. Sources et mécanismes du colmatage.....	20
3.2.3. Remédiation.....	22
4. Enquête sur les problèmes liés au vieillissement des FPR.....	23
4.1. Méthodologie.....	23
4.1.1. Sondage.....	23
4.1.2. Cas de dysfonctionnements remontés directement à Irstea.....	24
4.1.3. Informations collectées pour chaque station.....	24
4.1.4. Traitement des données.....	24
4.2. Résultats.....	25
5. Conclusion.....	30
6. Bibliographie.....	32
7. Table des illustrations.....	35
8. Annexe 1 : Remarque sur la base de données d'auto-surveillance.....	37
8.1. Une base de données en évolution constante.....	37
8.2. Des dates de mise en service erronées.....	37
9. Annexe 2 : liste des stations de traitement des eaux usées de type filtres plantés	

de roseaux de plus de 25 ans d'après la base de données de l'autosurveillance.....	38
10. Annexe 3 : retour sur le vieillissement des Filtres Plantés de Roseaux (FPR)....	39
11. Remerciements.....	45

- **ETUDE SUR LE VIEILLISSEMENT DES FILTRES PLANTÉS DE ROSEAUX**

1. Introduction

Les filtres plantés de roseaux (FPR) représentent une solution particulièrement adaptée pour le traitement des eaux usées en milieu rural. Son dimensionnement extensif permet de limiter les installations électro-mécaniques et donc de réduire les coûts d'exploitation tout en rendant le système plus résilient. Cette technique se prête également particulièrement bien à un usage en assainissement décentralisé, lorsque l'habitat est dispersé en hameaux distants. La filtration sur support fin garanti par ailleurs des niveaux de rejet bas. Tout ceci a participé au succès de la filière en milieu rural.

Cette étude, s'appuyant sur les retours du groupe d'Evaluation des Procédés Nouveaux d'Assainissement des petites et moyennes Collectivités (EPNAC), a pour objectif de dresser un premier état des lieux des dysfonctionnements rencontrés par la filière filtres plantés de roseaux tout particulièrement dans le contexte du vieillissement du parc d'installations. Cet état des lieux doit permettre d'identifier des pistes de recherche ainsi que des actions prioritaires à mener de façon à éviter la multiplication des dysfonctionnements et à anticiper les opérations de réhabilitation.

Ce rapport est composé de trois parties. La première dresse un état des lieux de la filière FPR, leur nombre, leur répartition géographique et surtout leur âge. En effet, la question de la réhabilitation ou du remplacement de ces ouvrages est amenée à devenir un sujet très important dans les années à venir car l'investissement qui devra être consenti par les communes est conséquent et qu'il n'existe pas de méthode permettant de prédire quand celui-ci devra avoir lieu. Dans la deuxième partie, la bibliographie existante sur le colmatage est passée en revue et les modèles théoriques expliquant les mécanismes du colmatage (et tout particulièrement sur le 1^{er} étage) sont présentés. La dernière partie du rapport présente les résultats d'un sondage réalisé auprès des SATESE afin d'identifier les dysfonctionnements qu'ils ont pu constater.

2. Etat des lieux de la filière

Ce travail s'est effectué à partir des données d'autosurveillance collectées au titre de la directive ERU¹ et de la base de données de la PLAtforme NaTionale Dynamique d'Evaluation des Filtres plantés (PlanteDéfi). La base de données d'autosurveillance est mise à jour annuellement (<http://assainissement.developpement-durable.gouv.fr/services.php>). Celle utilisée dans le cadre de cette étude date de 2018. La base de données PlanteDéfi a pour objectif de fournir aux organismes membres du groupe EPNAC un accès aux performances de traitement des stations de traitement des eaux usées (STEU) de types filtres plantés de végétaux sur l'ensemble du territoire Français. Sur la base de « bilans 24h » intégrés via l'auto-surveillance ou des mesures spécifiques, la base permet de consulter des données et de réaliser des traitements statistiques simples permettant de mieux appréhender le fonctionnement des ouvrages au regard de leur dimensionnement et de leur conception. Cette base de données a pour vocation, de part un apport des données des SATESE, des agences techniques départementales et d'Irstea, d'avoir une vision progressive de l'évolution de la technologie.

L'avantage de la base de données d'autosurveillance est quelle est plus complète que celle présente dans PlanteDéfi² (<https://plantedefi.irstea.fr/>). Cependant, elle présente un certain nombre de limites :

¹arrêté 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

²La base de données de Plante Défi a été initialement constituée à partir des données d'autosurveillance en date de 2014. Elle comprend actuellement des informations sur 3 245 stations FPR alors que 4 620 sont renseignés dans la base de données d'autosurveillance de 2018.

(i) elle ne prend en compte que les stations de plus de 200 équivalent-habitants et donc tend à sous-estimer le nombre d'installations FPR existantes, (ii) elle n'est pas exhaustive et comprend certaines erreurs (voir Annexe 1 : Remarque sur la base de données d'auto-surveillance) comme le souligne une mise en garde sur le site du portail de l'assainissement communal, "les données des stations [...] inférieures à 2 000 Eh ont [...] un taux de fiabilité beaucoup plus faibles que pour les stations de plus de 2 000 Eh". PlanteDéfi, de son côté, ne recense pas l'ensemble des données existantes mais des données fiables, validées par les producteurs de données et contrôlées par les gestionnaires de PlanteDéfi. PlanteDéfi contient également des informations techniques sur les filtres, comme leur nombre, leur surface et leur composition qui n'existe pas dans la base d'auto-surveillance. Il existe donc un intérêt à croiser les informations en provenance de ces deux sources. Dans l'analyse ci-dessous, nous sommes uniquement intéressés aux données issues de la métropole.

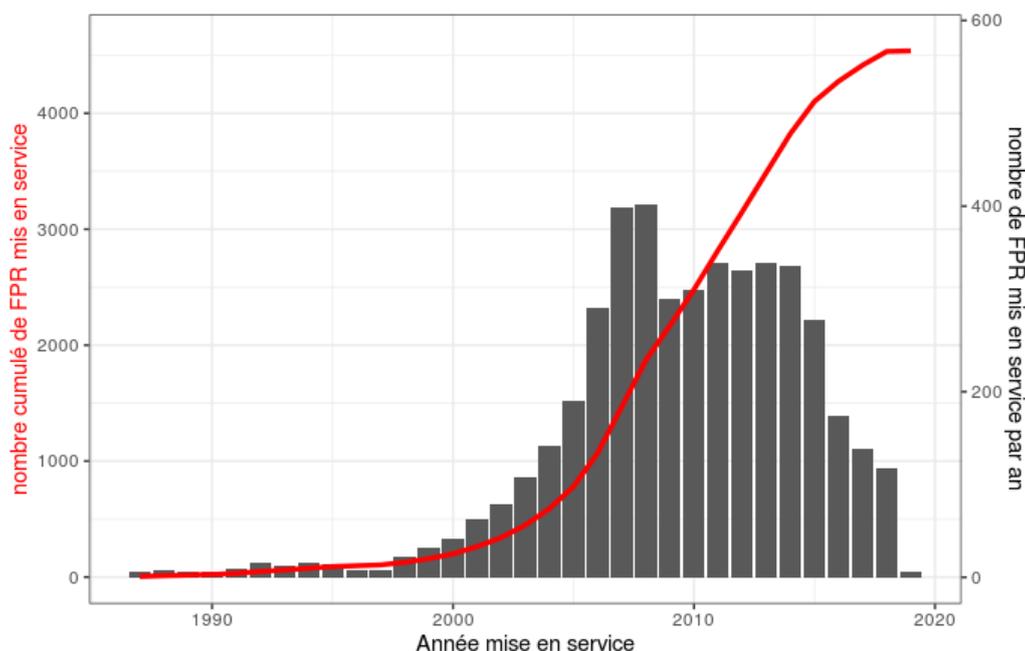


Figure 1. Evolution temporelle du nombre cumulé de filtres plantés de roseaux (en rouge) et du nombre de constructions par an (histogramme). Les données de 82 stations ont été ignorées car la date de mise en service était antérieure à 1987. (données 2018)

Après la très forte croissance enregistrée au début des années 2000 et rapportée par Molle *et al.*, (2005), **le rythme de construction de nouvelle station s'est ralenti pour se stabiliser entre 250 et 300 stations par an entre 2009 et 2015** (Figure 1). Une inflexion est observée en 2016 mais dont l'amplitude est difficile à estimer du fait du biais associée à la mise à jour de la base de données d'auto-surveillance (voir Annexe 1 : Remarque sur la base de données d'auto-surveillance).

En 2018, le nombre de filtres plantés de roseaux de capacité supérieure à 200 équivalent-habitants répertorié dans le fichier d'auto-surveillance était de 4620.

Les FPR représentent 21% des installations de traitement des eaux usées de taille supérieure à 200 équivalent-habitants et ont une capacité nominale cumulée de 114.92 tonnes de $\text{DBO}_{5/j}$ (1.8% de la capacité de l'ensemble des stations de plus de 200 équivalent-habitants). Les FPR sont particulièrement présents dans la moitié sud de la France métropolitaine, dans des départements à faible densité de population (Figure 2 et Figure 3).

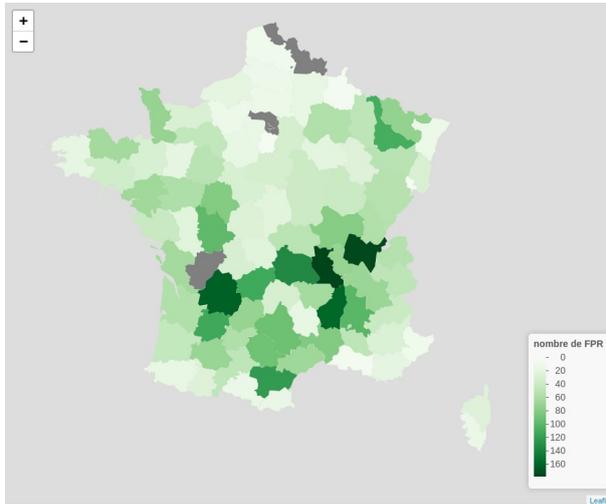


Figure 2. Nombre de filtres plantés de roseaux de capacité supérieure à 200 équivalent-habitants par département (données 2018)

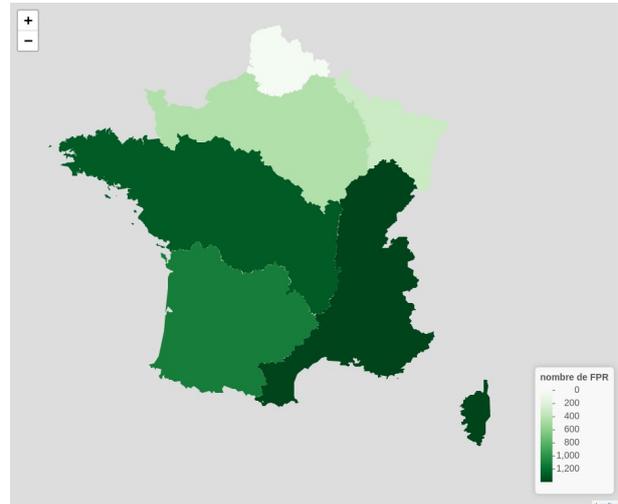


Figure 3. Nombre de filtres plantés de roseaux de capacité supérieure à 200 équivalent-habitants par bassin (données 2018).

La Figure 4 présente la pyramide des âges des FPR. Il n'existe pas à ce jour d'étude permettant d'estimer la durée de vie de ces installations. La plus vieille station encore en service (Gensac-la-Pallue, 16) date de 1987³ et a donc aujourd'hui plus de 30 ans. D'après la base de données d'autosurveillance, 76 stations ont plus de 25 ans (voir Annexe 2 : liste des stations de traitement des eaux usées de type filtres plantés de roseaux de plus de 25 ans d'après la base de données de l'autosurveillance.) et 159 ont plus de 20 ans. La classe des filtres ayant entre 5 et 15 ans est la mieux représentée et correspond au pic de construction des FPR. **La valeur médiane de l'âge des stations est de 10 ans.**

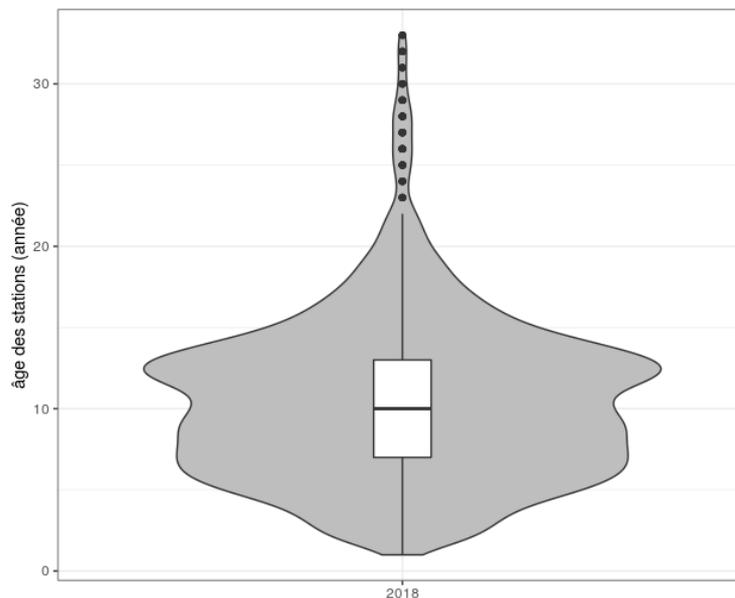


Figure 4: Pyramide des âges des FPR (données 2018).

En 2018, L'âge médian des FPR était de 10 ans.

Dans le domaine des eaux usées, la durée de vie théorique d'une station de traitement des eaux usées est comprise entre 30 et 40 ans. Il est donc tout particulièrement intéressant de suivre l'évolution des stations les plus anciennes alors qu'elles se rapprochent de cette valeur. Il est également important de remarquer que l'âge de la station ne fournit qu'une information biaisée sur son

³La mise en place des FPR sur cette station s'est effectuée en deux tranches : une première mise en service en 1985 et la seconde en 1987.

vieillessement. En effet, contrairement aux STEU de type boues activées, les MES et la biomasse produite ne sont pas extraits régulièrement, et seulement en partie durant les opérations de curage. L'âge d'un FPR dépend donc de la charge polluante que la station a traitée.

Afin d'être en mesure de prévoir et d'anticiper les besoins de renouvellement, il est indispensable de savoir dans quelle mesure les durées d'amortissement actuellement prise en compte et qui se fondent largement sur l'expérience acquise dans le domaine des boues activées peuvent s'appliquer aux installations de type FPR. A cette fin, il semblerait judicieux de mettre en place un suivi des stations les plus âgées en s'appuyant par exemple sur la liste présente dans l'Annexe 2 : liste des stations de traitement des eaux usées de type filtres plantés de roseaux de plus de 25 ans d'après la base de données de l'autosurveillance. et en ayant pris soin préalablement de vérifier l'exactitude de la date de mise en service de chacune des stations.

Un suivi des stations les plus âgées permettrait d'anticiper le besoin de renouvellement de l'ensemble du parc de filtres plantés de roseaux.

3. Vieillessement des filtres plantés de roseaux : encrassement et colmatage

3.1. *Modèle théorique de l'encrassement du 1^{er} étage d'un FPR*

Nous définissons par « **encrassement** », l'accumulation de matière (organique ou minérale) au sein du massif filtrant qui conduit à une réduction de sa porosité mais sans provoquer de dysfonctionnement ou de dégradation des performances. Dans cette partie, nous introduisons un modèle théorique expliquant la formation des dépôts à la surface et au sein du massif filtrant.

3.1.1. Formation du dépôt de surface et cycle alimentation/repos

Lors du démarrage d'un FPR (Figure 5), le premier mécanisme à se mettre en place est la filtration. Les diamètres équivalents des MES en entrée sont compris entre 0,1 μm (colloïdes) et 40 μm (entrefer usuellement recommandé pour le dégrilleur en tête de station). La Figure 6 présente des exemples de distributions granulométriques mesurées en entrée d'une station de taille moyenne (2 000 EH). La valeur médiane du diamètre des particules se situe autour de 20 μm .

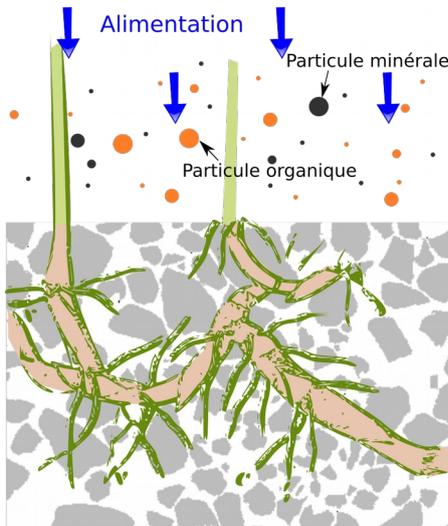


Figure 5. Début d'alimentation sur un filtre neuf

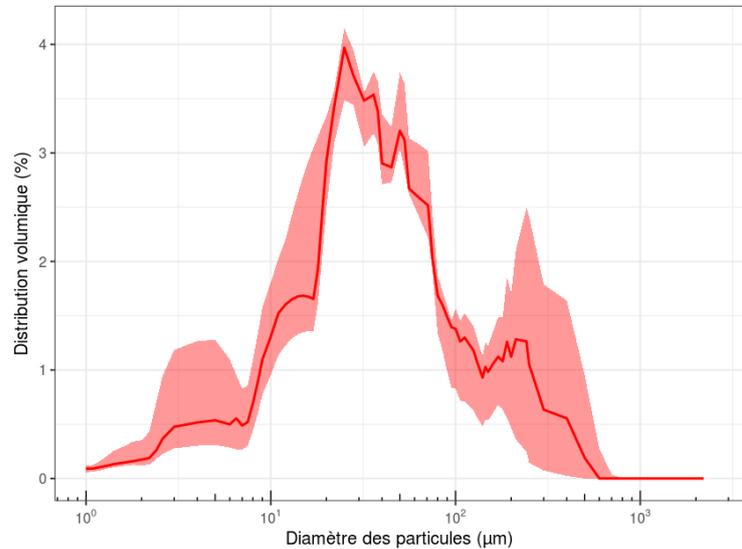


Figure 6. Distribution volumique de taille de particules en entrée de 5 stations (800 EH < capacité < 2000 EH). Source: (Masson *et al.*, 2019)

Dans un premier temps, il existe de nombreux pores de grande taille à la surface du filtre qui permettent à des particules de taille variée de s'infiltrer. Ces dernières sont alors en partie retenue dans le massif filtrant (Figure 7). On parle alors de **filtration en profondeur** (Leclerc, 1998). Par ce mécanisme, le filtre est susceptible de retenir des particules d'un diamètre plus faible que celui de son réseau de pores, compte-tenu de la tortuosité de ce dernier (Muresan *et al.*, 2013; Sacramento *et al.*, 2015). Et ceci, en évitant qu'un trop grand nombre de particules ne soit retenu dans les premiers pores du massif filtrant ce qui entraînerait son colmatage. L'efficacité de la filtration en profondeur dépend de la géométrie du réseau de pores.

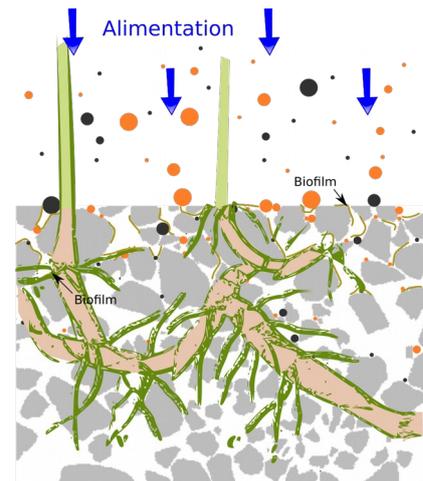


Figure 7. Phénomène de filtration en profondeur sur le 1^{er} étage de FPR

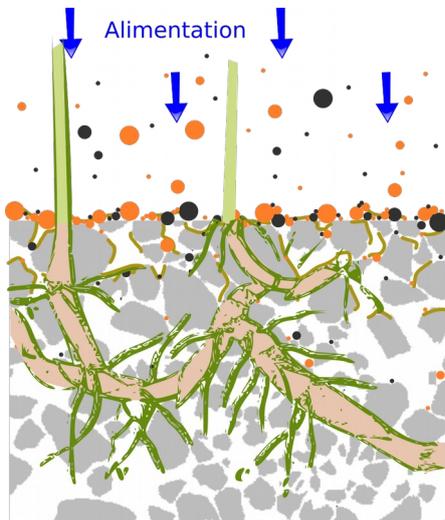


Figure 8. Formation d'un gâteau de filtration à la surface du filtre

À la fin de la période d'alimentation, le dépôt de surface forme une couche plastique (Figure 9), contenant beaucoup d'eau (jusqu'à $0.75 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, (Morvannou *et al.*, 2013)). Les biofilms, à la surface et dans le massif filtrant, ont également considérablement augmenté en taille du fait de la croissance bactérienne mais également par l'eau qu'ils ont piégée en sécrétant des substances polymériques extracellulaires, le tout conduisant à une forte réduction des vitesses d'infiltration.

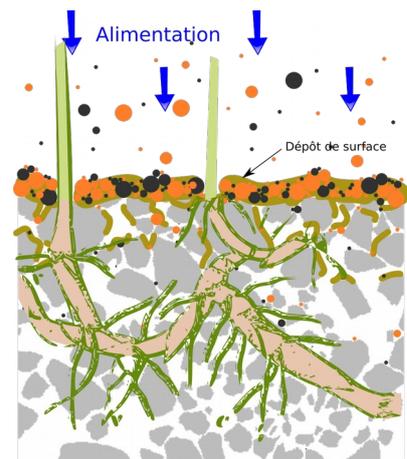


Figure 9. Mise en place du dépôt de surface et croissance du biofilm dans le massif filtrant au cours de la phase d'alimentation

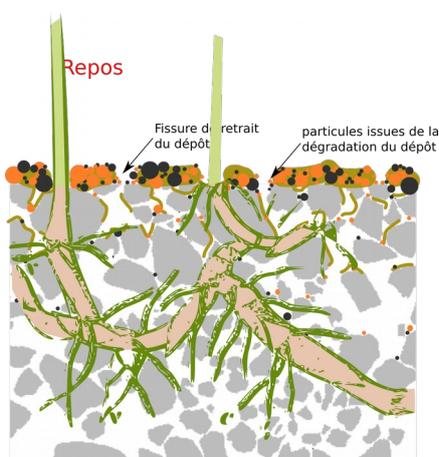


Figure 10. Réduction de la taille du biofilm et déshydratation du dépôt de surface pendant la phase de repos.

Progressivement, les pores de surface sont obstrués par les MES les plus grossières et se forme alors un gâteau de filtration (Figure 8) que nous appelons **dépôt de surface** dans le domaine des FPR (Molle, 2014). La filtration est alors contrôlée par ce dernier. Au sein du filtre et dans le dépôt en surface, l'activité bactérienne se met progressivement en place. Celle-ci se produit principalement au sein de biofilms qui permettent aux communautés bactériennes de résister aux périodes de fonctionnement sans effluent (Flemming et Wingender, 2010). Ces biofilms bactériens sont particulièrement présent autour des racines (Münch *et al.*, 2007). En plus de ce rôle de support pour la croissance de la biomasse, les tiges de roseaux qui traversent le dépôt permettent le maintien d'un écoulement et la diffusion de l'oxygène au sein du filtre.

Durant la période de repos, le dépôt de surface se déshydrate progressivement jusqu'à atteindre sa limite de plasticité (Vincent *et al.*, 2012). À partir de ce moment, le dépôt se craquelle au fur et à mesure qu'il sèche (Figure 10). Le rôle de la matière lignieuse (très présente dans le dépôt de surface) sur ce processus demeure un point à approfondir.

L'oxygène pénètre alors en profondeur dans le dépôt accélérant la minéralisation de ce dernier (Petitjean *et al.*, 2016). La formation de ces fissures de retrait est essentielle pour restaurer la capacité d'infiltration du filtre.

Deux mécanismes contrôlent la formation du dépôt : la filtration en profondeur et la filtration par gâteau.

L'activité bactérienne continue à dégrader les polluants stockés pendant la période d'alimentation, mais les cinétiques se ralentissent au fur et à mesure de la période de repos. Les bactéries produisent également des enzymes pour dégrader la matière organique particulaire qui a été retenue par filtration, participant au phénomène de minéralisation. Durant la période de repos, l'épaisseur des biofilms tend à se réduire. Les particules organiques retenues sont progressivement fragmentées voire transformées en sous-produits solubles. Lors de la prochaine phase d'alimentation, elles seront entraînées dans le massif filtrant. Même si la filtration de surface devient le principal mécanisme de rétention des particules une fois le dépôt formé, la filtration en profondeur reste un mécanisme déterminant du bon fonctionnement des FPR car elle contrôle le devenir des particules qui se détachent du dépôt.

La filtration en profondeur et la croissance bactérienne sont les deux principaux mécanismes responsables de l'encrassement. La filtration en profondeur est un mécanisme encore peu étudié dans le domaine des FPR. Nous ne disposons pas, pour le moment, de critères sur les caractéristiques du massif filtrant susceptibles de prédire si la filtration en profondeur s'effectuera de façon satisfaisante ou non⁴. La croissance bactérienne est principalement contrôlée par la lyse bactérienne durant la période de repos. Cette dernière est fortement conditionnée par une bonne ré-oxygénation du massif filtrant et donc par la géométrie de ce dernier et la quantité de matière organique retenue en son sein.

3.1.2. Grands cycles d'accumulation de matière dans le 1^{er} étage des FPR

Le premier cycle est l'alternance alimentation / repos décrite précédemment. A celui-ci s'ajoute des mécanismes saisonniers. L'été favorise le séchage du dépôt par évapotranspiration ainsi que sa dégradation alors que l'hiver, le dépôt a tendance à croître plus rapidement et à rester à l'état plastique (Molle, 2014).

Enfin, le troisième cycle important est celui du curage. Lorsque la couche de dépôt atteint environ 20 cm, il est préconisé de la retirer en effectuant un curage des filtres. En effet, plus le dépôt de surface est épais et plus il lui sera difficile de se déshydrater durant les périodes de repos. Il est donc essentiel d'en limiter l'épaisseur. Nous ne disposons malheureusement que d'un retour d'expérience limité sur le fonctionnement du filtre après son curage, ce dernier reposant principalement sur les observations réalisées sur la station de Gensac-la-Pallue. Il a été observé que les curages ont tendance à se rapprocher dans le temps⁵.

Pour expliquer ce phénomène, nous proposons l'hypothèse suivante synthétisée dans la Figure 11 : une fois le curage réalisé, une phase de filtration en profondeur, similaire à celle décrite au paragraphe précédent avant la mise en place du dépôt de surface, se produit à nouveau jusqu'à ce que le dépôt de surface se reforme. Néanmoins, la quantité de dépôt présente dans les premiers centimètres du massif filtrant participe à une filtration plus efficace et donc à une re-formation plus rapide du dépôt surface. En conséquence, l'accumulation de matières par filtration en profondeur, après un curage, sera moindre que lors de la mise en service de la station, mais également moins importante qu'après le curage précédent. Enfin, l'accumulation du dépôt au sein du massif filtrant tend à réduire sa vitesse de minéralisation car, étant plus épais, l'oxygène y pénètre moins facilement.

⁴Le choix du gravier sur le premier étage est d'autant plus important qu'une filtration peu efficace à ce niveau est susceptible d'entraîner le colmatage du massif filtrant au deuxième étage dont la granulométrie est plus fine.

⁵La station de Gensac-la-Pallue reçoit une charge organique estimée à 0,59 kgDCO/(m².j). Les filtres ont été curés en moyenne la première fois après 10 ans, la seconde fois après 8,5 ans, la troisième fois après 6,4 ans et la quatrième fois après 6,2 ans.

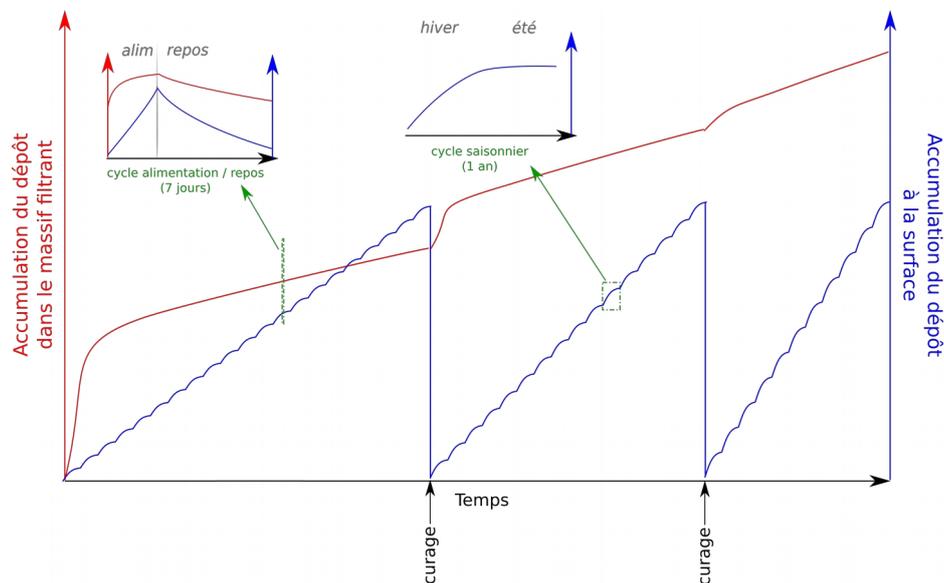


Figure 11. Evolution théorique de l'accumulation des dépôts de surface et au sein du massif filtrant au cours du temps

3.1.3. Où s'accumule la matière dans le filtre ?

L'encrassement du massif filtrant conduit à en modifier sa structure. (Caselles-Osorio *et al.*, 2007) ont estimé que dans des FPR à écoulement horizontal, le dépôt se formait majoritairement dans l'espace interstitiel des pores plutôt qu'à la surface des graviers. Hua *et al.*, (2010) font le même postulat pour des FPR à écoulement vertical. Cette organisation du dépôt dans les pores a été observée pour la première fois par Kim et Forquet (2016) grâce à des lames minces réalisées à partir d'échantillons non remaniés (Figure 12). L'observation à l'aide des lames minces a également permis de mettre en évidence l'existence d'un réseau de macropores qui permettent de maintenir une capacité d'infiltration suffisante malgré la réduction de la porosité ainsi que la présence de nombreux pores de tailles plus petites à l'intérieur du dépôt susceptibles de retenir l'eau par capillarité durant les périodes de repos. Cette observation a plus tard été vérifiée sur des hauteurs d'échantillons plus grandes grâce à la tomographie de rayon X (Martinez-Carvajal *et al.*, 2019).

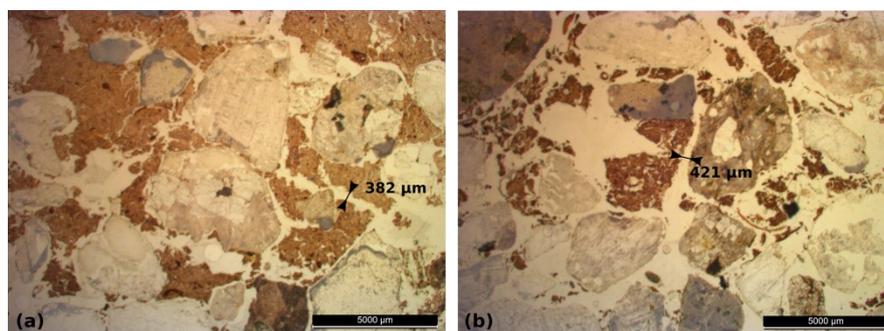


Figure 12. Lames minces réalisées sur des échantillons non remaniés du massif filtrant d'un premier étage de FPR. Le dépôt est visible en marron et les graviers en gris clair.

Nous avons observé que l'espacement entre les graviers tend à croître proche de la surface donnant l'impression que certains graviers migrent vers la surface (Figure 13). Ce phénomène pourrait s'expliquer par un mécanisme de ségrégation par taille connu en géotechnique sous le nom du phénomène des noix du Brésil (Duran, 1999). Dans un mélange granulaire hétérogène, les particules les plus fines, lorsque soumises à des contraintes se déplacent, ont tendance à repousser les particules de plus grande taille vers la surface. Le développement des rhizomes est un autre facteur pouvant expliquer ce phénomène. La conséquence est que la porosité macroscopique du massif diminue⁶ (pour atteindre des valeurs inférieures à 10 % sur un filtre mature alors que la porosité initiale

⁶Certains auteurs (Hua *et al.*, 2010) rapportent que la porosité diminue également par compression du dépôt lorsqu'une lame d'eau est présente à la surface du filtre.

se situe autour de 40 %, (Martinez-Carvajal *et al.*, 2020), ce qui pourrait réduire la diffusion d'oxygène et donc la minéralisation de la matière organique accumulée. Ceci irait à l'encontre de l'hypothèse selon laquelle, dans le massif filtrant, le flux de particules provenant de la surface et la biomasse produite par l'activité bactérienne durant la période d'alimentation sont compensés par la solubilisation du dépôt suite à sa minéralisation et la lyse bactérienne durant la période de repos.

Dans le filtre, l'accumulation de dépôt conduit à la formation d'un réseau de micropores en son sein capable de retenir l'eau et de l'échanger avec un réseau de macropores drainant l'ensemble du massif filtrant.

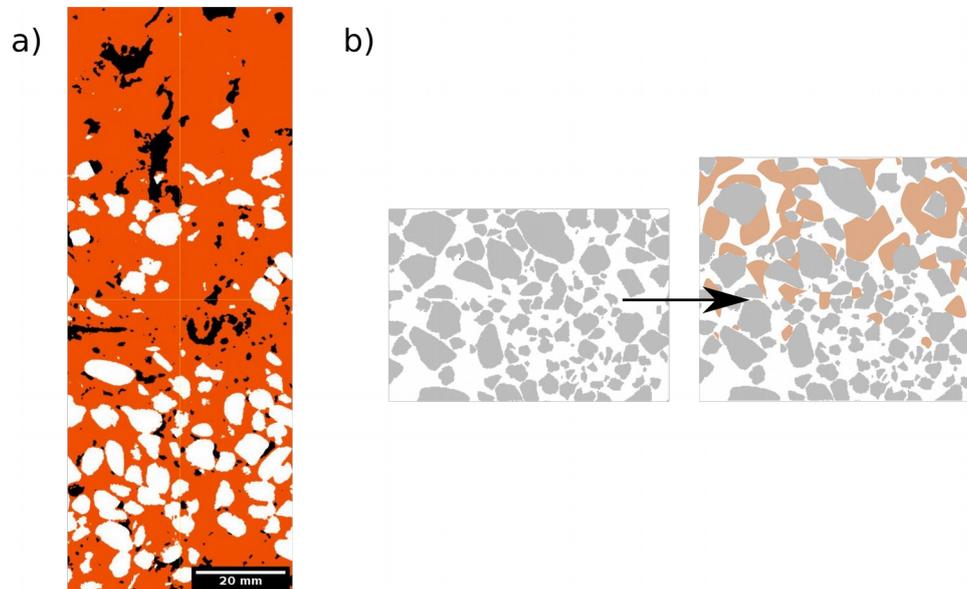


Figure 13. Phénomène de décompaction du massif, a) observé sur la station de Montromant (69) par tomographie de rayon X (marron: dépôt; blanc: gravier, noir:air), b) théorique avec à gauche le massif filtrant originel et à droite sa modification sous l'action du dépôt. Remarque: la résolution de la tomographie de rayon X ne permet d'observer que la macroporosité (>40 μm).

Pour conclure ce paragraphe, les hypothèses présentées ici sont un scénario probable de l'encrassement des filtres qui s'appuie sur des observations réalisées à différentes échelles. Ce scénario reste à être vérifié par l'expérience et les cinétiques d'encrassement (Figure 11) restent à être mesurées afin d'établir l'importance relative de la filtration en profondeur et de la croissance bactérienne ainsi que pour estimer la durée de vie des filtres.

3.1.4. Autres mécanismes essentiels de formation, de régulation et de structuration du dépôt

Il a déjà été montré que les roseaux jouent un rôle important dans le maintien de la perméabilité de la couche de dépôt durant la période d'alimentation en maintenant des cônes d'infiltration le long de leurs tiges (Molle *et al.*, 2006). Les rhizomes semblent également jouer un rôle important dans la structuration du dépôt sous la surface. Il a également été montré qu'ils étaient un lieu de fixation privilégié du biofilm.

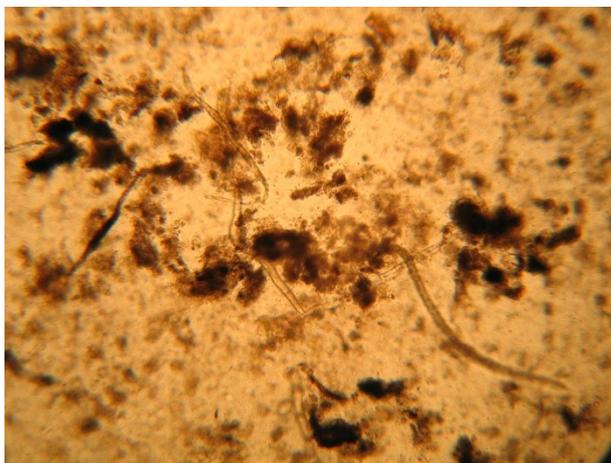


Figure 14. Nématodes présents dans le dépôt de surface (observation microscopique après dilution, grossissement : 125)

Les FPR se caractérisent également par une biodiversité très importante (Figure 14). A l'instar des systèmes de traitement intensif, on retrouve des protozoaires qui exercent une pression prédatrice sur les biofilms et ainsi participent à leur régulation. Mais la chaîne trophique est particulièrement développée et l'on observe une macrofaune absente des systèmes de traitement intensif. Le rôle des lombrics a été particulièrement étudié pour leur pouvoir de bioturbation (Jones *et al.*, 1994). Mais d'autres insectes sont susceptibles de rendre des services similaires. Un travail important reste à faire dans ce domaine afin d'établir dans quelle mesure cette diversité est susceptible d'améliorer la décomposition du dépôt et le maintien de condition aérobie dans le massif filtrant (Ouattara *et al.*, 2009).

3.2. Que sait-on aujourd'hui des mécanismes de formation du colmatage ?

On définit par « **colmatage** » une réduction de la capacité d'infiltration ne permettant plus d'accepter de nouveaux volumes sur le filtre en fonctionnement et conduisant à un dysfonctionnement de l'installation et/ou à une dégradation importante des performances. La présence de flaquage ne permet pas à elle seule de définir le colmatage. En effet, en période hivernale ou suite à un temps de pluie important, il peut arriver que l'effluent stagne à la surface du filtre entre deux bâchées, voire pendant plusieurs jours après la fin de l'alimentation.

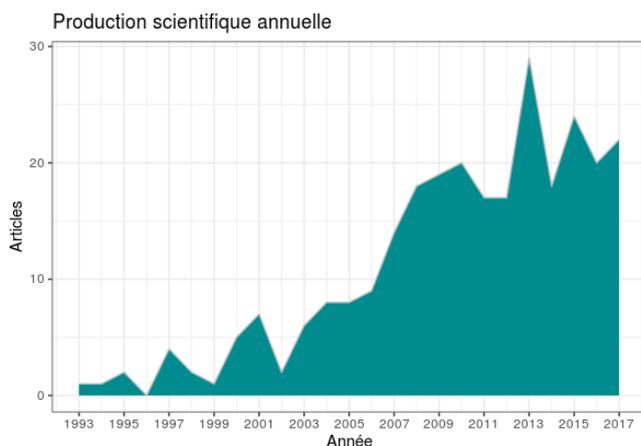
Cette section s'appuie sur la bibliographie existante. Une requête⁷ sur le moteur de recherche Scopus nous a permis d'identifier 271 documents. À partir de cette liste un premier tri a été effectué pour isoler 105 articles portant spécifiquement sur le colmatage, son origine et ses effets. Il est à noter, qu'à la différence de ce rapport, il n'est souvent pas fait de distinction terminologique entre encrassement et colmatage bien que ces deux termes existent en anglais (« fouling » et « clogging »). Enfin, les FPR alimentés par des eaux usées brutes demeurent encore très largement une spécificité française. La majorité de la bibliographie existante traite donc de problème de colmatage se produisant malgré l'existence d'un traitement primaire.

La bibliographie en langue française est plus difficile à identifier car il s'agit souvent de littérature grise (peu ou mal bancarisée). Nous nous sommes appuyés sur les informations présentes sur le site EPNAC ainsi que sur le rapport de l'agence de l'eau Rhin Meuse sur le vieillissement des FPR (Bois *et al.*, 2013).

Pour chacune des sources bibliographiques, nous avons identifié :

- le type de FPR étudié (à écoulement vertical ou horizontal),
- la nature du travail effectué : expérimentation, modélisation ou bibliographie,
- les méthodes employées.

⁷La requête est : TITLE-ABS-KEY (constructed AND wetland AND clogging) et a été effectuée le 6 février 2018.



Répartition des ouvrages suivant le mode d'écoulement

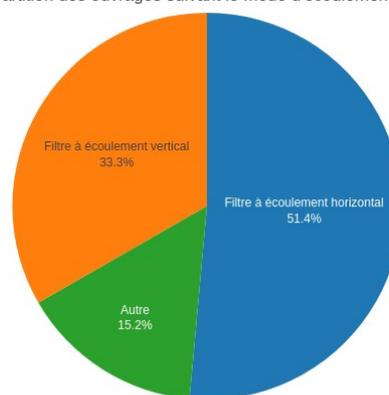


Figure 15. (à gauche) Nombre de publications par année, (à droite) répartition des sources entre FPR à écoulement vertical ou horizontal.

La Figure 15 illustre l'évolution du nombre de publication portant sur le colmatage des FPR. Il s'agit d'une thématique de plus en plus étudiée mais qui reste encore marginale dans le domaine des filtres plantés. En 2013, année où 29 articles ont été publiés sur le colmatage, 654 articles ont été publiés sur les filtres plantés représentant donc un peu plus que 4% des publications. 51% des articles étudiés portent sur des filtres horizontaux, 33% portent sur des filtres verticaux. Pour 16% des sources, il n'a pas été possible de les classer suivant le type de filtre planté. La dominance des études portant sur les filtres horizontaux s'explique (i) par le fait que cette technologie est bien plus répandue à l'échelle mondiale, (ii) et qu'ils sont beaucoup plus sensible au colmatage que les filtres à écoulement vertical. 6 articles de synthèse bibliographique ont déjà été consacrés au sujet, 10 proposent une approche par modélisation et le reste présente des résultats d'expérience (56) ou leur contenu n'était pas accessible (33).

3.2.1. Méthodes utilisées

Le Tableau 1 synthétise les mesures qui ont été mises en œuvre pour le suivi du colmatage dans les différentes études. Les mesures les plus employées étant la teneur en matières sèches, la teneur en matières volatiles et la conductivité hydraulique *in-situ*.

Tableau 1. Listes des mesures utilisées pour caractériser le colmatage

Mesures hydrauliques	<ul style="list-style-type: none"> • Vitesse d'infiltration • Conductivité hydraulique à saturation <i>in-situ</i> • Conductivité hydraulique à saturation en laboratoire • Porosité effective ou drainable • Mesure de la teneur en eau par sondes capacitives • Mesure de la teneur en eau libre et liée par résonance magnétique nucléaire. • Traçages
Mesures chimiques	<ul style="list-style-type: none"> • Matières volatiles par perte au feu • Fractionnement par extraction des différentes phases (dont matières humiques) • Carbone organique total • Matières sèches • Diffraction par rayon X • Polyssacharides, protéines
Mesures biologiques	<ul style="list-style-type: none"> • Fumigation • Respirométrie • Activité enzymatique • Comptage des bactéries • PCR, DGGE

	<ul style="list-style-type: none"> • Séquençage
Mesures Physiques	<ul style="list-style-type: none"> • Fractionnement granulométrique par filtration tangentielle • Surface spécifique⁸ • Coefficient de dispersion pour les gaz • Résistance à l'abrasion (test de Los Angeles) • Granulométrie laser • Microscopie électronique • Tortuosité • Lames minces • densité
Mesures sur l'environnement	<ul style="list-style-type: none"> • Teneur en oxygène • Potentiel d'oxydo-réduction • température

3.2.2. Sources et mécanismes du colmatage

Parmi les sources listées dans le Tableau 2, le colmatage physique par la filtration des MES et le colmatage biologique par croissance du biofilm dominant. Il existe cependant un débat sur leur contribution relative et l'avis des auteurs divergent sur ce point. Cependant, les charges hydrauliques et organiques entrantes doivent être prises en compte lorsque l'on compare les résultats d'expériences si diverses. Knowles *et al.* (2011) ont comparé des données issues d'Allemagne (Winter et Goetz, 2003), du Royaume-Uni, des Etats-Unis et de France (Boutin *et al.*, 1997)⁹. Les FPR à écoulement vertical se retrouvent principalement en France et en Allemagne. La charge hydraulique médiane reçue par les filtres verticaux en Allemagne est de 0,3 m/j et la charge médiane en matière en suspension est de 3 g/m²/j¹⁰, alors qu'en France la charge hydraulique moyenne est de 0,37 m/j pour une charge moyenne en MES de 106 g/m²/j. Cependant, en Allemagne, le nombre de cas de colmatage reporté est beaucoup plus important qu'en France (Knowles *et al.*, 2011). L'application d'alternance et la nature du matériau filtrant sont les principaux paramètres susceptibles d'expliquer cette différence. Le dernier étant vraisemblablement déterminant car, non seulement la filtration en profondeur s'effectue sur une hauteur de matériau plus faible lorsque celui-ci est fin (et donc plus de particules s'accumulent sur une épaisseur plus faible), mais un support fin comme le sable est également susceptible d'être affecté par un colmatage biologique du fait de la croissance du biofilm.

L'application de l'alternance et le recours à un matériau plus grossier (le gravier) semble expliquer le peu de cas de colmatage observé en France comparé à l'étranger.

Tableau 2. Les sources du colmatage

Résidu végétaux et rhizomes	<p>Le rôle des racines dans le colmatage a été au cœur d'un important débat au début du développement des FPR dans les années 90. Il semble aujourd'hui établi que les rhizomes n'augmentent pas mais on plutôt tendance à réduire la porosité. La quantité de matières lentement biodégradables (5 à 15 % réfractaire d'après Kadlec et Wallace, 2008) amenées par la sénescence des feuilles et des tiges est également un facteur important de colmatage (~1 à 2 kg/m²/an). Ceci souligne l'importance du faucardage.</p>
-----------------------------	--

⁸Il existe des méthodes expérimentales pour mesurer la surface spécifique (par exemple la Méthode de Brunauer Emmett et Teller, BET), mais celles-ci n'ont pas été mises en œuvre dans les articles étudiés. Le calcul repose alors sur des hypothèses géométriques et la mesure de la porosité.

⁹Les travaux de Knowles *et al.* en 2011 s'appuie malheureusement sur une source ancienne et les charges reprises dans son analyse ne sont pas celles appliquées sur la majorité des FPR en France : nous avons donc corrigés les données à partir de celles de (Morvannou *et al.*, 2015) afin de réaliser des comparaisons non biaisées.

¹⁰En Allemagne, les FPR sont systématiquement précédés d'un prétraitement.

Matières en suspension	Les MES présentes dans l'effluent en entrée sont retenues au sein du massif filtrant par différents mécanismes suivant la taille des particules. Les plus grandes sont bloquées par la taille des pores et du fait de leur inertie alors que les plus petites sont interceptées par attraction électrostatique ou par des amoncellements de particules au niveau des gorges entre les pores.
Biofilm	L'apport de nutriment et de sources de carbone biodégradable permet le développement de populations bactériennes sur les parois du substrat minéral mais également au sein du dépôt au sein de biofilms. Ces biofilms sont principalement composés d'eau qui est emmagasinée grâce à la production de polymères extracellulaires. C'est cette association qui est responsable de la réduction de la porosité.
Précipités	Suivant les conditions de pH et de potentiel d'oxydo-réduction, des précipités peuvent se former dans les pores du massif filtrant
Érosion	La composition minéralogique du substrat influence la dureté de ce dernier. Si ce dernier est susceptible de s'éroder, cela engendrera des particules fines qui participeront au colmatage.
Gaz	L'activité bactérienne est productrice de gaz qui sont susceptibles d'être piégés dans la matrice poreuse réduisant ainsi l'espace disponible pour l'écoulement. Ce phénomène a principalement été observé sur des FPR à écoulement horizontal.

Enfin, si les mécanismes élémentaires à l'origine du colmatage semblent bien connus, la manière dont ils se combinent pour conduire au colmatage semble encore aujourd'hui en partie méconnue (Knowles *et al.*, 2011). Il existe probablement plusieurs enchaînements de phénomènes qui peuvent conduire au colmatage. Dans le paragraphe suivant, nous présentons un scénario susceptible d'expliquer certaines formes de colmatage de surface. La vérification ou la réfutation expérimentale de celui-ci est nécessaire et reste encore à accomplir.



Figure 16. Formation d'une couche colmatante (beige clair) parfois appelée *slime* au-dessus du dépôt de surface.

Sur la Figure 16, on peut observer la couche colmatante (parfois appelée *slime*) qui peut parfois se former sur un filtre. Si la littérature s'accorde sur le fait qu'elle se compose principalement d'exopolymères d'origine biologique, elle ne s'accorde pas sur sa composition chimique. D'après McKinley et Siegrist (2011), cette dernière serait principalement composée de substances humiques et plus particulièrement d'acides humiques et d'humine. Elles formeraient un réseau de fibres microscopiques de 20-30 μm de longueur et d'environ 1 μm d'épaisseur. Des observations similaires ont été réalisées en laboratoire sur des modèles de réseau de pores (Dupin et McCarty, 2000). Knowles *et al.* (2011) soulignent également le potentiel colmatant des substances humiques en insistant sur leurs natures colloïdale et hydrophilique qui leur permettent de retenir des quantités très importantes d'eau, le dépôt

pouvant atteindre des teneurs en eau volumique de 80 % (Tanner *et al.*, 1998). Zhong *et al.* (2013) mettent également en avant le rôle des substances humiques mais ces dernières seraient principalement composées d'acides fulviques et le facteur principal de colmatage serait plutôt la teneur en composés organiques labiles. Toutefois, les auteurs ne précisent pas de quels composés il s'agit et comment ces derniers sont en mesure d'emmagasiner de grandes quantités d'eau. Enfin, Kania *et al.* (2018) mesurent également la présence importante de matières humiques dans des filtres non colmatés et soulignent qu'elles peuvent également avoir un rôle bénéfique dans la formation du dépôt en permettant la formation de micro-agrégats.

La production de quantités importantes d'exo-polymères représente un coût énergétique important pour les communautés bactériennes et elles ne les sécrètent que si cela est vraiment nécessaire. Il est souvent mentionné que le colmatage est lié à un fonctionnement anaérobique. Or, le mode de respiration anaérobique ne fournit pas une grande quantité d'énergie et les bactéries ne produisent donc pas de grandes quantités d'exo-polymères préférant consacrer l'énergie à la croissance cellulaire.

McKinley et Siegrist (2011) avancent l'explication suivante pour expliquer ce phénomène : si des conditions anaérobiques sont amenées à se développer pendant une période suffisamment longue pour permettre la mise en place d'une communauté bactérienne anaérobique et que les conditions environnementales changent et deviennent légèrement aérobies, les bactéries anaérobiques vont alors produire des exo-polymères pour se protéger de l'oxygène. Il est vraisemblable que ce mécanisme soit effectif même lorsque le filtre fonctionne normalement mais se limite à des points chauds (hotspots) au sein de micro-pores. Une hypothèse pour expliquer la formation de la couche colmatante serait la propagation de ces conditions à l'ensemble du dépôt. Une étude menée à Irstea sur les filtres à sable (Petitjean *et al.*, 2016), où la concentration en oxygène a été mesurée en continu à différentes profondeurs, montre que pendant les périodes d'alimentation, la concentration en oxygène proche de la surface varie significativement (entre 20 % et 100 % de la teneur à saturation) au cours d'une bûchée lors d'un fonctionnement normal et lors de la période de repos, une valeur proche de 100 % est atteinte rapidement permettant la minéralisation des exo-polymères produits par les bactéries. Par contre, lorsque la charge hydraulique augmente, il est observé que les périodes sous le seuil de 20 % s'allongent jusqu'à l'apparition du colmatage. Le seuil entre respirations anaérobique et aérobie se situe entre 0,013 et 0,2 mg/L en oxygène dissous, soit environ entre 0,16 et 2,5 % de la teneur à saturation (Chiang *et al.*, 1989).

Des travaux de recherche sont encore nécessaires afin de mieux comprendre l'enchaînement des mécanismes conduisant à la formation d'une couche de dépôt colmatante.

3.2.3. Remédiation

Le colmatage observé sur les FPR à écoulement horizontal a conduit les chercheurs à fortement réduire la durée de vie opérationnelle estimée de ces installations (de 50-100 ans pour Conley *et al.*, (1991) et Bavor et Schultz (1993) à 8 ans pour Griffin *et al.*, (2008)), mais également à imaginer des techniques afin de dé-colmater les filtres. Le Tableau 3 liste les techniques de remédiation qui ont été imaginées et tester, pour la plus part à l'échelle du laboratoire et pour quelques unes à l'échelle de filtres en fonctionnement.

Tableau 3: Techniques de remédiation (Du *et al.*, 2016 ; Hua *et al.*, 2010 ; Miranda *et al.*, 2016 ; Nivala *et al.*, 2012)

Extraction des granulats et remplacement par un matériau propre	Opération coûteuse en manutention et surtout pour la mise en décharge des granulats souillés.
Extraction des granulats, nettoyage et remise en place	La société ARM a développé un équipement dédié pour réaliser cette opération qui n'est pas disponible à ce jour sur le marché français. Il est également nécessaire de prendre en compte le devenir des eaux de lavage lorsque cette technique est mise en œuvre.

Dé-colmatage au peroxyde d'hydrogène	Il s'agit de la méthode la plus rapide testée à ce jour sur une installation colmatée. Elle nécessite la manipulation de quantité importante de peroxyde et donc un personnel qualifié même si les risques sont limités. L'efficacité de cette technique sur le long-terme est inconnue.
Dé-colmatage à l'hypochlorite de sodium	Un essai réalisé en laboratoire est reporté dans la littérature. L'utilisation de cette technique sur le terrain semble plus délicate compte-tenu de la nocivité du produit.
Utilisation de lombrics	Technique d'ingénierie écologique par excellence. Peu coûteuse, elle nécessite néanmoins de ne pas alimenter le filtre pendant une période suffisamment longue. Cette technique souffre également du fait de ne pas avoir été suffisamment testée.
Utilisation d'une solution nutritive	L'idée est d'augmenter les cinétiques bactériennes de dégradation en alimentant le filtre avec une solution au ratio N/P optimal de 5 afin de minéraliser plus rapidement le dépôt. La seule expérience mentionnée dans la bibliographie indique un résultat concluant après 55 jours.
Utilisation de tensioactifs	L'idée est de solubiliser les polymères extra-cellulaires produits par les biofilm en utilisant une solution riche en tensioactifs. Les résultats en laboratoire indiquent un résultat positif avec des concentrations relativement élevées 0,12 g/L de rhamnolipides (tensioactif non dangereux pour l'environnement mais cher). Cette technique nécessite encore d'être évaluée sur le terrain.

La plupart des techniques de remédiation sont coûteuses et surtout l'efficacité sur le long terme reste inconnue. Dans le cadre d'une étude de marché réalisée par Irstea dans le cadre du développement d'un capteur pour anticiper la formation d'une couche colmatante, le coût d'une opération de dé-colmatage par remplacement partiel des granulats a été estimé à 15 000 €HT.

4. Enquête sur les problèmes liés au vieillissement des FPR

4.1. Méthodologie

4.1.1. Sondage

Un sondage a été mis en place à l'aide de l'outil *LimeSurvey*. L'ensemble des questions du sondage est présent dans l'Annexe 3 : retour sur le vieillissement des Filtres Plantés de Roseaux (FPR). Les réponses ont été collectées entre juin 2016 et juin 2017. Le nombre de réponse complète est de 45 sur les 129 entrées enregistrées dans le sondage comme l'illustre la Figure 17. Sur les 45 réponses complètes, nous avons retenus 37 cas correspondant à des dysfonctionnements importants.

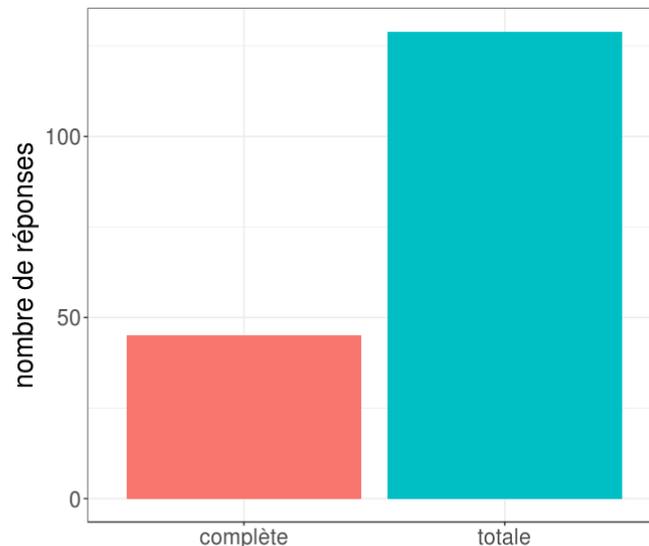


Figure 17: Nombre total de réponses et nombre de réponses complètes au sondage.

La longueur du sondage, le format choisi (une réponse = une station, obligeant les participants à recommencer autant de fois qu'il avait de stations à décrire), ainsi que l'interface qui n'était pas familière aux participants, explique le nombre important de réponses incomplètes.

4.1.2. Cas de dysfonctionnements remontés directement à Irstea

Nous avons également reçu des informations provenant de SATESE où de collectivités rencontrant des difficultés avec leur installation FPR et qui nous ont contacté directement. Cela concerne 12 stations dans cette étude.

4.1.3. Informations collectées pour chaque station

Pour chaque station, nous avons établi une carte d'identité composée de 3 sections :

- Les informations descriptives de la station (code SANDRE, altitude, nombre d'équivalent-habitant, débit nominal, dégrilleur, commune, département, bassin versant, constructeur, type de réseau).
- Les taux de charges hydraulique et organique, calculés à partir des bilans 24 h lorsque ceux-ci sont disponibles dans la base de données PlanteDéfi.
- L'historique de la station et les observations réalisées par les exploitants où les techniciens des SATESE afin d'identifier la nature et les causes du dysfonctionnement.

4.1.4. Traitement des données

Les charges hydrauliques et organiques des bilans 24 heures des stations étudiées ont été comparées avec celles de l'ensemble des stations ayant un premier étage vertical alimenté en eaux brutes. Pour rendre la comparaison plus aisée, nous avons calculé des statistiques représentant la distribution des valeurs des charges organiques et hydrauliques qui sont : la médiane, la moyenne et les premier et troisième quartiles. Le nombre de bilans 24 heures par station étant très variable, et afin d'éviter une surreprésentation des stations ayant le plus de bilans, nous avons eu recours à une technique de ré-échantillonnage (bootstrapping) qui consiste à sélectionner aléatoirement pour chaque station les résultats d'un bilan 24 heures et de calculer à partir de ce sous-échantillon les statistiques voulues. L'opération est répétée un grand nombre de fois (50 000). Nous avons donc 50 000 valeurs pour chacune des grandeurs statistiques que nous souhaitons calculer et la moyenne de ces valeurs tend vers la valeur de la grandeur statistique recherchée.

Nous avons également calculé l'accumulation de solides totaux qui ajoute à la masse de MES retenue celle de la biomasse créée. Cette dernière est approchée par la formule du binôme (Duchène, 1999) :

$$\Delta MS = \frac{k(MES + DBO)}{2}$$

avec ΔMS l'accumulation totale de nouveaux solides, MES et DBO les flux de MES et DBO traités et k un coefficient dépendant du type de réseau k = 0,84 pour un réseau séparatif et k = 1,02 pour un réseau unitaire).

La charge entrante en MES est également comparée avec le ratio DCO/MES suivant une approche similaire à ce qui a été réalisé sur les biofiltres (Vázquez *et al.*, soumi).

Enfin, les causes présumées des dysfonctionnements rencontrés ont été catégorisées et classifiées.

4.2. Résultats

La Figure 18 illustre la répartition géographique des stations où des dysfonctionnements ont été signalés. Plus que des disparités géographiques quant aux difficultés rencontrées avec la filière filtre planté, cette figure indique plutôt les départements ayant répondu au sondage.

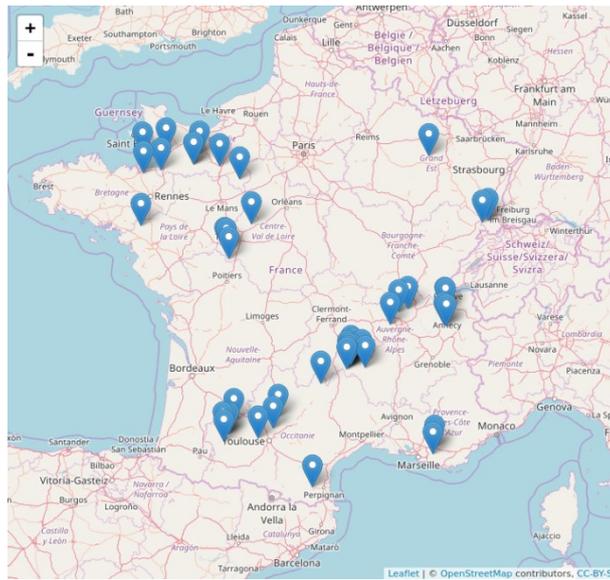


Figure 18. Emplacement des stations étudiées.

La plus ancienne de ces stations a été mise en service en 1992, la plus récente en 2014. L'année de création médiane étant 2006. Il s'agit donc dans leur ensemble de stations plutôt âgées.

Sur l'ensemble les 49 stations identifiées, nous disposons de 90 bilans 24 heures dans PlanteDéfi mais qui ne portent que sur 10 installations avec une station qui, à elle seule, compte près de 50 % de ces bilans (47) comme le montre la Figure 19.

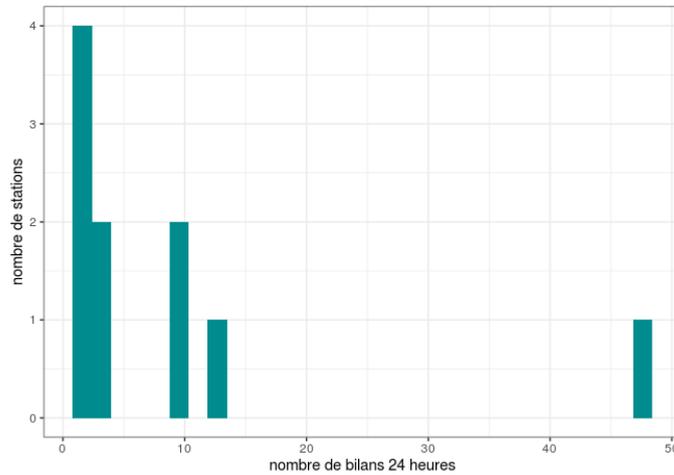


Figure 19: Nombre de stations suivant le nombre de bilans 24 heures disponibles par station (parmi les 49 stations étudiées).

Lorsque les charges hydrauliques et organiques associées à ces bilans sont comparées à celles reçues par l'ensemble des FPR recevant de l'eau usée sans pré-traitement, les mêmes tendances sont observées (Figure 20). Pour l'ensemble des stations pour lesquelles nous disposons de bilans 24 heures, les charges organiques médianes et moyennes sont respectivement de $127 \text{ g m}^{-2}\text{j}^{-1}$ et $161 \text{ g m}^{-2}\text{j}^{-1}$, soit bien inférieures à la valeur de dimensionnement usuellement retenue de $300 \text{ g m}^{-2}\text{j}^{-1}$. Parmi les bilans 24 heures des stations étudiées, seuls 3 excèdent la valeur de dimensionnement. En revanche, les charges hydrauliques observées pour l'ensemble des stations pour lesquelles nous disposons de bilans 24 heures sont beaucoup plus proches des valeurs de dimensionnement avec des valeurs médiane et moyenne égales à, respectivement, $0,22 \text{ m j}^{-1}$ et $0,34 \text{ m j}^{-1}$. Il est particulièrement intéressant de noter que la valeur du 3^{ème} quartile est supérieure à la valeur de dimensionnement ce qui signifie que plus de 25 % des stations présentent des surcharges hydrauliques. Ceci reflète le constat généralement observé de réseau en milieu rural recevant beaucoup d'eaux claires parasites. En ce qui concerne les stations mises en avant dans l'étude, seules deux stations ont des bilans 24 heures où la charge hydraulique dépasse celle de dimensionnement, mais avec des valeurs pouvant dépasser 1 m j^{-1} . Il est tout particulièrement intéressant de noter que pour la station disposant du plus grand nombre de bilans 24 heures (47), 3 ont une charge hydraulique dépassant la valeur de dimensionnement (soit 6,4 % des bilans 24 heures).

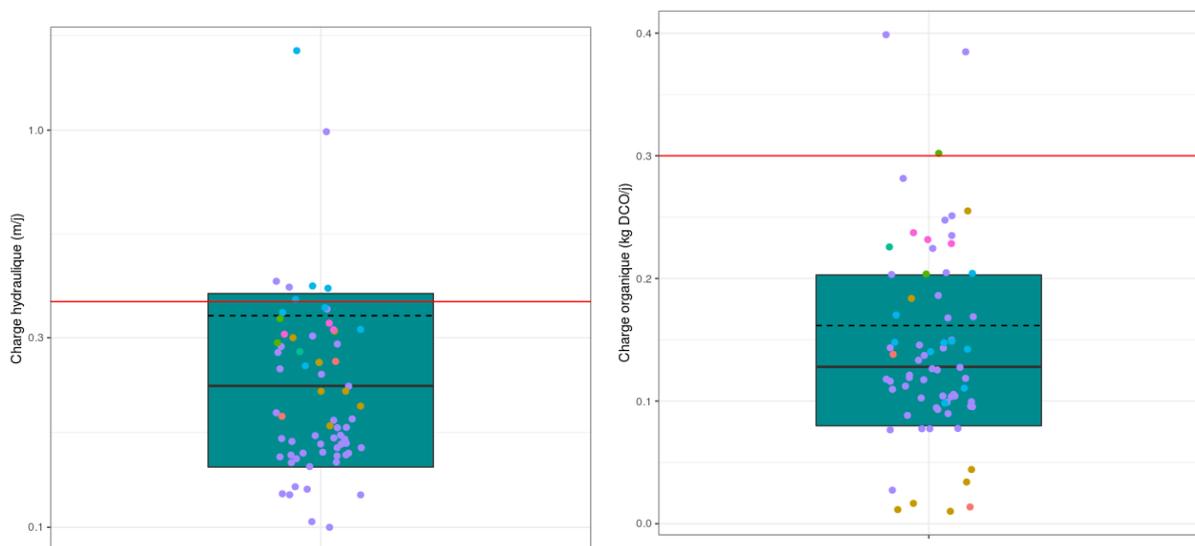


Figure 20: Charges hydraulique (à gauche) et organique (à droite). Le trait rouge représente les valeurs usuellement prises pour le dimensionnement. Les points représentent les charges mesurées sur les stations étudiées (chaque couleur correspond à une station). La boîte à moustache représente la distribution des valeurs des charges sur les premiers étages de l'ensemble des

stations pour lesquelles nous disposons de bilans 24 heures dans PlanteDéfi. Les limites hautes et basses correspondent aux 1^{er} et 3^{ème} quartiles respectivement, la ligne pleine entre-elles correspond à la médiane et la ligne pointillée à la moyenne.

La Figure 20 permet d'avoir une représentation de la situation des stations vis-à-vis des recommandations en terme de dimensionnement. Mais si l'on souhaite avoir une métrique informant plus directement du colmatage, on peut tracer l'apport en solides totaux au cours du bilan 24 heures qui est liée d'une part au dépôt des MES qui sont retenus, mais également les solides produits par l'activité biologique (Figure 21).

Plus de 25 % des stations présentent des bilans 24 heures où la charge hydraulique dépasse 037 m.j⁻¹

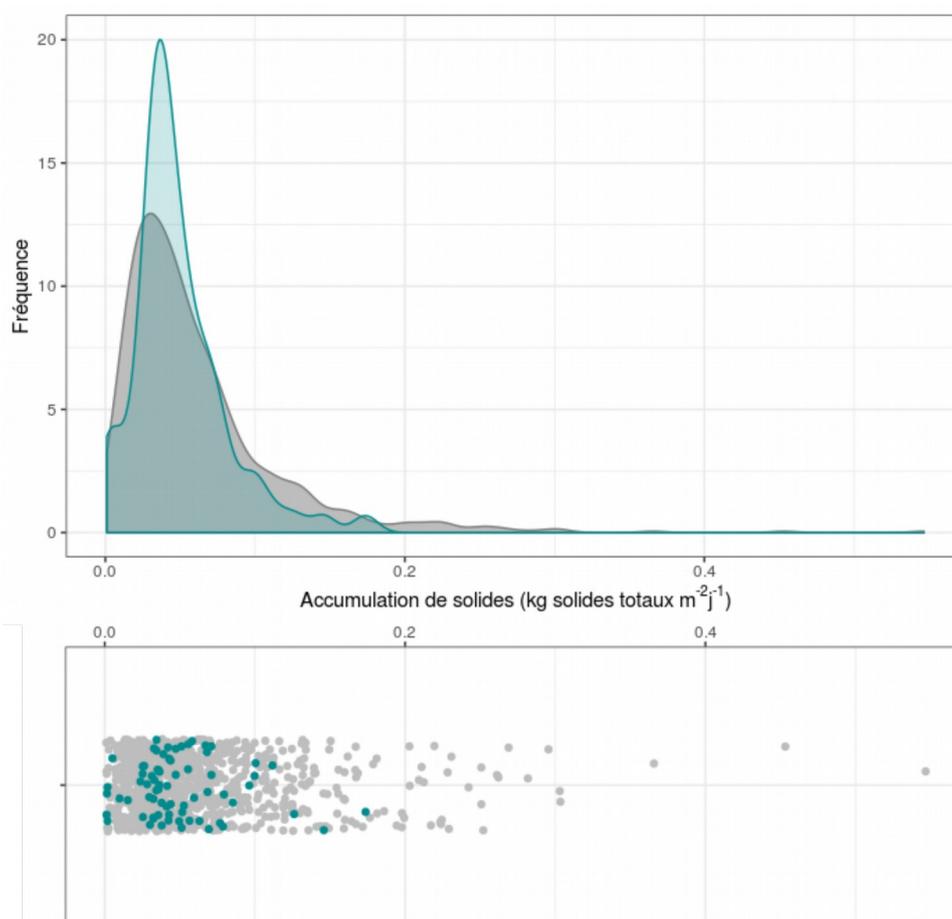


Figure 21: Accumulation de solides (lié à l'activité biologique et au dépôt de MES) sur le premier étage de filtres plantés de roseaux. Fréquence (en haut) et mesures indépendantes (en bas). En gris, l'ensemble des résultats de la base de données PlanteDéfi et en vert les stations de l'étude.

Les distributions ne sont pas significativement différentes (test de Wilcoxon, $W = 34038$, $p\text{-value} = 0.34$) entre les stations de l'étude et celles pour lesquelles nous disposons de bilans 24 heures dans PlanteDéfi. Il est intéressant de noter que la forme de la distribution de l'accumulation de solides est peu dispersée avec 95 % des valeurs inférieures à $0,16 \text{ kg m}^{-2}\text{.j}^{-1}$.

La Figure 22 présente la répartition des charges en MES en entrée de station en fonction du ratio DCO/MES. Une forte charge en MES est susceptible d'accélérer le colmatage de surface (filtration par gâteaux) si le dépôt est déjà en place tandis qu'un ratio DCO/MES élevé indique qu'une forte activité bactérienne est susceptible de se développer au sein du massif filtrant entraînant un colmatage en profondeur.

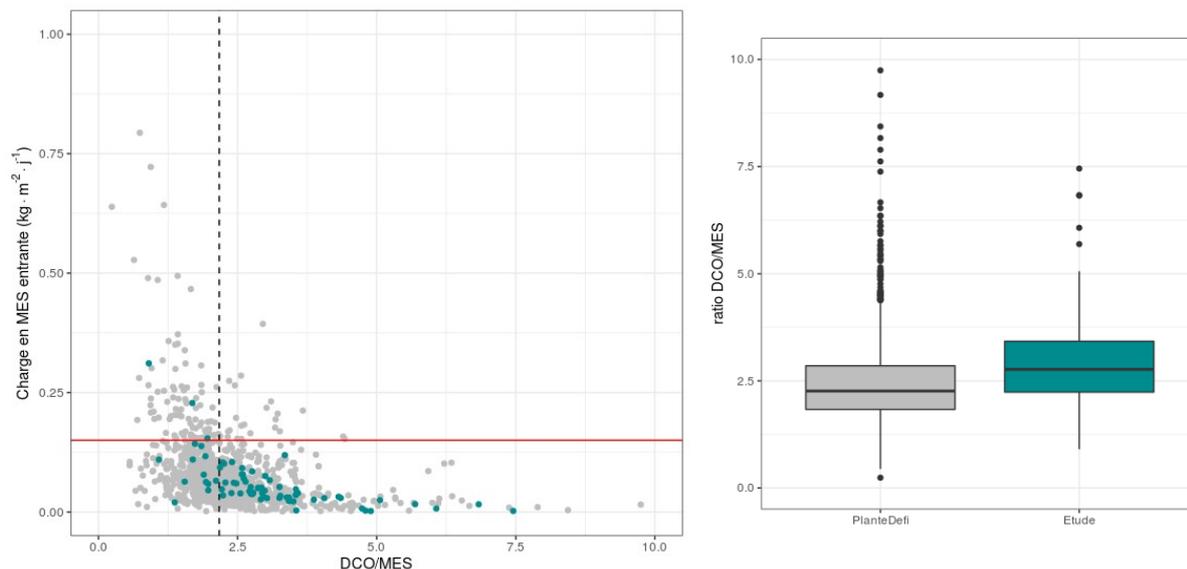


Figure 22: A gauche, charge en MES entrante en fonction du ratio DCO/MES pour l'ensemble des stations pour lesquelles nous disposons de bilans 24 heures (en gris) ainsi que pour les stations mises en avant dans l'étude (en vert). La ligne horizontale rouge correspond à la valeur de dimensionnement usuellement retenue et la ligne verticale pointillée représente la valeur moyenne du ratio DCO/MES pour des effluents d'entrée en zone rurale (Mercoiret, 2009). A droite, comparaison des distributions du ratio DCO/MES entre les bilans des filtres de l'étude et l'ensemble des bilans 24 heures de PlanteDefi.

Sur la Figure 22, les points s'organisent suivant une forme de L avec un étalement prédominant suivant l'axe DCO/MES. Ceci s'explique aisément car les fortes charges en MES sont fréquemment associées à des événements pluvieux ayant un ratio DCO/MES faible. Par contre, les bilans 24 heures associés aux filtres étudiés présentent un ratio DCO/MES significativement différent et plus élevé que les autres bilans 24 heures de la base de données (test de Wilcoxon, $W = 27884$, $p\text{-value} = 4,2 \cdot 10^{-6}$).

Cette analyse statistique, même si elle est très limitée par ses moyens (peu de bilans 24 heures pour les stations présentant des dysfonctionnements), met en avant deux pistes d'explication du développement du colmatage :

- Une part significative ($> 25\%$) des FPR ont des bilans 24 heures dont le débit dépasse la valeur de dimensionnement. Même si cette filière a fait la preuve qu'elle est susceptible d'accepter des surcharges hydrauliques (Molle *et al.*, 2006), leurs récurrences et leurs durées dans le temps sont des facteurs encore mal compris.
- Les stations mises en avant dans cette étude reçoivent un effluent en entrée dont le ratio DCO/MES est significativement plus élevé en moyen que celui observé sur le reste du parc. Ceci pourrait être associé à une plus forte susceptibilité de ces ouvrages à développer un colmatage en profondeur.

Les résultats de l'enquête vont être à présent décrits de façon plus détaillée. Tout d'abord, il nous semble important de préciser que sur les 49 stations recensées, 26 sont colmatées de sorte que le fonctionnement hydraulique de la station est impacté (surverses) et les performances de traitement sont affectées (non respect des normes de rejet).

Sur les 49 stations recensées, 26 sont colmatées entraînant surverses et non-respect des normes de rejet.

Un autre enseignement important est que les problèmes de colmatage affectent aussi bien le 1^{er} étage (14 cas) que le 2^{ème} étage (12) dans la configuration classique à deux étages verticaux. Le reste des cas de colmatage rapportés correspondent à d'autres configurations et notamment à l'utilisation de filtres horizontaux. Enfin, il est à noter que sur certaines stations les deux étages de traitement sont colmatés avec souvent le colmatage du premier étage entraînant celui du deuxième.

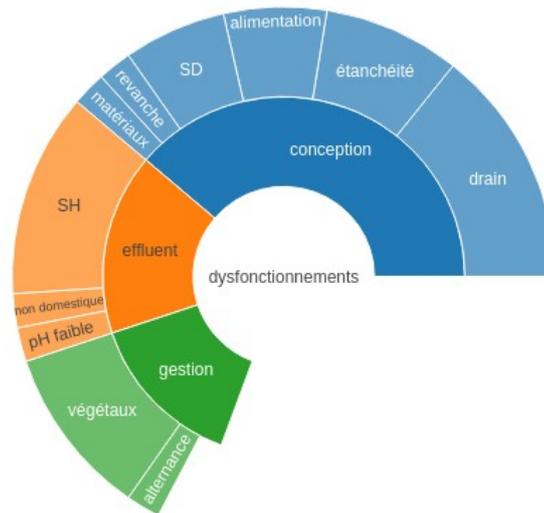


Figure 23: Causes probables des dysfonctionnements. SD : sous-dimensionnement, SH : surcharge hydraulique

Les causes probables des dysfonctionnements sont synthétisées dans la Figure 23. Nous proposons de classer en trois catégories :

- les problèmes de conceptions ;
- les problèmes de gestion ;
- les problèmes d'effluent en entrée.

Différents problèmes de conception ont été mis en évidence : (i) des parois de séparation pas assez hautes entraînent un déversement dans les filtres au repos en cas de surcharge hydraulique et donc une diminution des périodes de repos, (ii) la plantation de *Phalaris* à la place de *Phragmite* induit une diminution du rôle mécanique de la tige (beaucoup plus tortueuse et souple dans le cas du *Phalaris*), (iii) la plantation de roseaux trop jeunes ou à une densité trop faible ce qui limitent leur rôle dans la déshydratation du dépôt de surface. Des problèmes au niveau des drains ont également pu être observés en France et à l'étranger (Brix, 2017). La pente du tuyau peut ne pas être bonne et conduire à une saturation partielle du fond du filtre. Les fentes des drains peuvent également être obstruées, notamment par des racines, et ce d'autant plus facilement qu'elles sont étroites. La granulométrie du matériau utilisé au premier étage peut également poser problème. Un matériau trop grossier est susceptible d'être traversé par une quantité importante de MES qui pourront colmater le deuxième étage. Sur le premier étage, cela retardera la formation du dépôt de surface et donc accélérera le phénomène d'encrassement du massif filtrant. Il semble également qu'une granulométrie trop fine ne permette pas la mise en place d'une filtration en profondeur. Le dépôt s'accumule dans les tous premiers centimètres et obstruent les pores. Cela conduit à une forte réduction de la perméabilité et donc à un accroissement des périodes de flaquage. La question de la granulométrie reste particulièrement sensible car les mécanismes et la façon de les quantifier restent encore largement méconnus. Plusieurs malfaçons et dysfonctionnements ont été observés sur les siphons et de façon plus générale les dispositifs d'alimentation. Enfin de nombreux cas de défaut d'étanchéité nous ont été rapportés.

Parmi les problèmes de conception rapportés, les drains (contre-pente, matériau, taille des fentes) et les systèmes d'alimentation (siphons et vannes dysfonctionnant) sont le plus fréquemment cités.

Les problèmes liés à la gestion que nous avons identifiés sont au nombre de deux : (i) le non-respect des alternances qui favorise la mise en place de conditions propices au colmatage sur le filtre

alimenté, (ii) l'absence de faucardage annuel tend à augmenter la hauteur de dépôt de boues et donc à limiter la ré-aération du milieu.

De façon plus générale, la gestion des végétaux et notamment des adventices est une réelle difficulté pour les exploitants.

La qualité et la quantité des eaux entrantes sont également des causes possibles de dysfonctionnements. Un effluent difficilement biodégradable, surtout si sa fraction particulaire est importante, entraînera un encrassement plus rapide car sa minéralisation sera plus lente. Un effluent contenant beaucoup de colloïdes présentera quant à lui des problèmes de déshydratation. Si les filtres plantés font preuves d'une robustesse prouvée face aux surcharges hydrauliques suite à des périodes de temps de pluie (Molle *et al.*, 2006), des surcharges hydrauliques trop fréquentes et dont les durées sont trop longues peuvent affecter la déshydratation du dépôt de surface.

5. Conclusion

Avec plus de 4 600 installations de plus de 200 EH, les FPR représentent plus de 20 % du parc français de STEU même si la charge cumulée traitée est faible.

L'enquête réalisée auprès des SATESE sur les dysfonctionnements rencontrés nous a permis de les classer en trois catégories : effluent, conception et gestion. Les problèmes de conception sont ceux qui sont le plus fréquemment rapportés avec en premier lieu des problèmes rencontrés au niveau des drains qui peuvent présenter des contre-pentes ou encore des fentes de tailles insuffisantes. Une mauvaise gestion des végétaux peut également être à l'origine de dysfonctionnements avec notamment la prolifération des adventices.

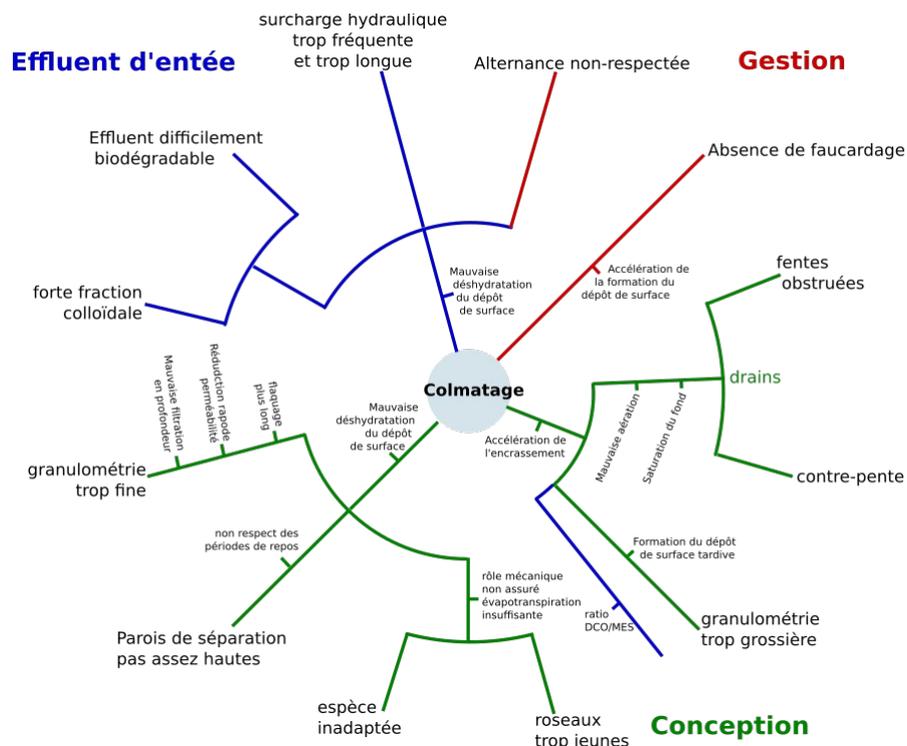


Figure 24. Diagramme des causes de dysfonctionnements pouvant entraîner un colmatage.

Parmi les 49 stations identifiées dans cette enquête, 26 sont colmatées entraînant surverses et un non-respect des normes de rejet. La Figure 24 présente un diagramme des causes susceptibles de conduire à un colmatage. Il faut bien distinguer le colmatage de l'encrassement normal des filtres. Le colmatage prématuré est très problématique sur les stations FPR car les exploitants ont peu de

solutions pour résoudre ce problème si ce n'est d'attendre ou de réaliser un curage anticipé coûteux. Il existe donc un effort à conduire pour comprendre les mécanismes de mise en place de ces colmatages et développer des stratégies préventives (indicateurs, capteurs) ainsi que des solutions curatives moins onéreuses que le curage. Il est également à noter que ces problèmes de colmatage affectent aussi bien le premier que le deuxième étage, mais que la cause initiale provient d'un dysfonctionnement au niveau du premier étage.

Parmi les causes susceptibles d'expliquer ces colmatages précoces, des surcharges hydrauliques fréquentes et de durées longues sont souvent mise en avant. Plus de 25 % des stations ont des bilans 24 heures dont la charge hydraulique dépasse la valeur de dimensionnement. Ces surcharges hydrauliques sont la conséquence de réseaux drainant des quantités importantes d'eaux claires parasites. Cette situation étant très répandue en milieu rural : il serait utile d'entamer un travail afin d'ajuster les recommandations en terme d'acceptation de surcharges hydrauliques ainsi que des ouvrages nécessaires pour y faire face (systématisation des by-pass, etc.). Afin d'être en mesure de quantifier ces surcharges hydrauliques, la mise en place d'un suivi en continu sur un échantillon représentatif de stations semble particulièrement indiqué.

La compréhension, et surtout la quantification de l'encrassement normal des FPR, sont un autre défi majeur si l'on veut être en mesure d'anticiper les besoins en renouvellement et en réhabilitation. A cette fin, des travaux de recherche sont encore nécessaires pour préciser les mécanismes d'encrassement et les différents paramètres constructifs dont ils dépendent. Ce travail pourrait se trouver renforcé par des campagnes de suivi ciblées sur les installations les plus anciennes en partenariat avec les SATESE. Enfin, il semble d'ores et déjà nécessaire d'envisager les technologies et les procédures qui seront nécessaires afin de conduire le remplacement et ou la réhabilitation des filtres plantés et qui seront à même de limiter les aménités environnementales ainsi que le coût financier pour les collectivités.

6. Bibliographie

- Bavor, H.J., Schultz, T.J., 1993. Sustainable suspended solids and nutrient removal in large-scale, solid-matrix, constructed wetland systems, in: *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*. Lewis Publishers, pp. 646–656.
- Bois, P., Laurent, J., Wanko, A., 2013. Mémoire technique - Étude du support granulaire de massifs filtrants de stations d'épuration de type « filtres plantés de roseaux à écoulement vertical ». Icube.
- Boutin, C., Liénard, A., Esser, D., 1997. Development of a new generation of reed-bed filters in France: first results. *Water Sci Technol* 35, 315–322. <https://doi.org/10.2166/wst.1997.0226>
- Caselles-Osorio, A., Puigagut, J., Segú, E., Vaello, N., Granés, F., García, D., García, J., 2007. Solids accumulation in six full-scale subsurface flow constructed wetlands. *Water Research* 41, 1388–1398. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.12.019>
- Chiang, C.Y., Salanitro, J.P., Chai, E.Y., Colthart, J.D., Klein, C.L., 1989. Aerobic Biodegradation of Benzene, Toluene, and Xylene in a Sandy Aquifer—Data Analysis and Computer Modeling. *Groundwater* 27, 823–834. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1989.tb01046.x>
- Conley, L.M., Dick, R.I., Lion, L.W., 1991. An Assessment of the Root Zone Method of Wastewater Treatment. *Research Journal of the Water Pollution Control Federation* 63, 239–247.
- Du, M., Xu, D., Trinh, X., Liu, S., Wang, M., Zhang, Y., Wu, J., Zhou, Q., Wu, Z., 2016. EPS solubilization treatment by applying the biosurfactant rhamnolipid to reduce clogging in constructed wetlands. *Bioresource Technology* 218, 833–841. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.07.040>
- Duchene, P., 1999. Estimation de la production des boues (No. 99/0688). Cemagref.
- Dupin, H.J., McCarty, P.L., 2000. Impact of Colony Morphologies and Disinfection on Biological Clogging in Porous Media. *Environ. Sci. Technol.* 34, 1513–1520. <https://doi.org/10.1021/es990452f>
- Duran, J., 1999. SABLES POUDRES ET GRAINS. Introduction à la physique des milieux granulaires. Eyrolles, Paris.
- Flemming, H.-C., Wingender, J., 2010. The biofilm matrix. *Nat Rev Microbiol* 8, 623–633. <https://doi.org/10.1038/nrmicro2415>
- Griffin, P., Wilson, L., Cooper, D., 2008. Changes in the use, operation and design of sub-surface flow constructed wetlands in a major UK water utility, in: *Proceedings of the 11th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control*. Presented at the 11th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control, Indore, India, pp. 419–426.
- Hua, G.F., Zhu, W., Zhao, L.F., Huang, J.Y., 2010. Clogging pattern in vertical-flow constructed wetlands: Insight from a laboratory study. *Journal of Hazardous Materials* 180, 668–674. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.04.088>
- Jones, C.G., Lawton, J.H., Shachak, M., 1994. *Organisms as Ecosystem Engineers* 15.
- Kadlec, R.H., Wallace, S., 2008. *Treatment Wetlands*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420012514>
- Kania, M., Gautier, M., Michel, P., Gourdon, R., 2018. Study of aggregation in surface sludge deposits from 14 full-scale French constructed wetlands using particle size distribution and dynamic vapor sorption analyses. *Water Science and Technology* 77, 79–90. <https://doi.org/10.2166/wst.2017.523>

- Kim, B., Forquet, N., 2016. Pore-scale observation of deposit within the gravel matrix of a vertical flow constructed wetland. *Environ Technol* 37, 3146–3150. <https://doi.org/10.1080/09593330.2016.1178334>
- Knowles, P., Dotro, G., Nivala, J., García, J., 2011. Clogging in subsurface-flow treatment wetlands: Occurrence and contributing factors. *Ecological Engineering* 37, 99–112. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.08.005>
- Leclerc, D., 1998. Filtration en profondeur Aspects théoriques. *Techniques de l'ingénieur Opérations unitaires : séparation de phases, décantation et filtration*.
- Liénard, A., 2010. Vertical flow constructed wetlands fed with raw sewage: Historical review and recent developments in France, in: 12th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control, 04/10/2010-08/10/2010, Venise, ITA.
- Martinez-Carvajal, G.D., Oxarango, L., Adrien, J., Molle, P., Forquet, N., 2019. Assessment of X-ray Computed Tomography to characterize filtering media from Vertical Flow Treatment Wetlands at the pore scale. *Sci Total Environ* 658, 178–188. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.119>
- Martinez-Carvajal, G.D., Oxarango, L., Clément, R., Molle, P., Forquet, N., 2020. Assessment of spatial representativity of X-ray tomography to study Vertical Flow Treatment wetlands. *Science of The Total Environment* 713, 136510. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136510>
- Masson, M., Guigues, N., Arhror, M., Raveau, S., Brosse, C., Forquet, N., 2019. Caractérisation de la matière organique d'eaux résiduaires et d'eaux de surface par les sondes spectrophotométriques UV-Visible. *Agence Française de la Biodiversité*.
- McKinley, J.W., Siegrist, R.L., 2011. Soil Clogging Genesis in Soil Treatment Units Used for Onsite Wastewater Reclamation: A Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 41, 2186–2209. <https://doi.org/10.1080/10643389.2010.497445>
- Mercoiret, L., 2009. *Qualité des eaux usées domestiques produites par les petites collectivités*. ONEMA.
- Miranda, S.T., de Matos, A.T., Baptestini, G.C.F., Borges, A.C., 2016. Evaluation of unclogging aspects in horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Water Sci Technol* 74, 1594–1601. <https://doi.org/10.2166/wst.2016.369>
- Molle, P., 2014. French vertical flow constructed wetlands: a need of a better understanding of the role of the deposit layer. *Water Sci Technol* 69, 106–112. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.561>
- Molle, P., Liénard, A., Boutin, C., Merlin, G., Iwema, A., 2005. How to treat raw sewage with constructed wetlands: An overview of the French systems. *Water Science and Technology* 51, 11–21.
- Molle, P., Liénard, A., Grasmick, A., Iwema, A., 2006. Effect of reeds and feeding operations on hydraulic behaviour of vertical flow constructed wetlands under hydraulic overloads. *Water Research* 40, 606–612. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.11.026>
- Morvannou, A., Forquet, N., Michel, S., Troesch, S., Molle, P., 2015. Treatment performances of French constructed wetlands: results from a database collected over the last 30 years. *Water Sci Technol* 71, 1333–1339. <https://doi.org/10.2166/wst.2015.089>
- Morvannou, A., Forquet, N., Vanclooster, M., Molle, P., 2013. Characterizing hydraulic properties of filter material of a vertical flow constructed wetland. *Ecol. Eng.* 60, 325–335. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.06.042>
- Münch, Ch., Neu, T., Kusch, P., Röske, I., 2007. The root surface as the definitive detail for microbial transformation processes in constructed wetlands – a biofilm characteristic. *Water Science and Technology* 56, 271–276. <https://doi.org/10.2166/wst.2007.527>

- Muresan, B., Saiyouri, N., Hicher, P.-Y., 2013. Dynamic Behavior of Straining in Randomly Packed Beads: Experimental Study. *J. Environ. Eng.* 139, 692–702. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000666](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000666)
- Nivala, J., Knowles, P., Dotro, G., García, J., Wallace, S., 2012. Clogging in subsurface-flow treatment wetlands: Measurement, modeling and management. *Water Research* 46, 1625–1640. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.12.051>
- Ouattara, J.-M.P., Coulibaly, L., Tiho, S., Gourène, G., 2009. Comparison of macrofauna communities in sediments of the beds of vertical flow constructed wetlands planted with *Panicum maximum* (Jacq.) treating domestic wastewater. *Ecological Engineering* 35, 1237–1242. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.05.007>
- Petitjean, A., Forquet, N., Boutin, C., 2016. Oxygen profile and clogging in vertical flow sand filters for on-site wastewater treatment. *J Environ Manage* 170, 15–20. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.12.033>
- Sacramento, R.N., Yang, Y., You, Z., Waldmann, A., Martins, A.L., Vaz, A.S.L., Zitha, P.L.J., Bedrikovetsky, P., 2015. Deep bed and cake filtration of two-size particle suspension in porous media. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 126, 201–210. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2014.12.001>
- Tanner, C.C., Sukias, J.P.S., Upsdell, M.P., 1998. Organic matter accumulation during maturation of gravel-bed constructed wetlands treating farm dairy wastewaters. *Water Research* 32, 3046–3054. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(98\)00078-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(98)00078-5)
- Vázquez, B.G., Choubert, J.M., Paul, E., Canler, J.P., soumi. COMMENT EVITER LE COLMATAGE IRREVERSIBLE DES INSTALLATIONS DE BIOFILTRATION ?
- Vincent, J., Forquet, N., Molle, P., Wisniewski, C., 2012. Mechanical and hydraulic properties of sludge deposit on sludge drying reed beds (SDRBs): Influence of sludge characteristics and loading rates. *Bioresource Technol* 116, 161–169. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.04.023>
- Winter, K.-J., Goetz, D., 2003. The impact of sewage composition on the soil clogging phenomena of vertical flow constructed wetlands. *Water Sci Technol* 48, 9–14. <https://doi.org/10.2166/wst.2003.0268>
- Zhong, X., Wu, Y., Xu, Z., 2013. Bioclogging in Porous Media Under Discontinuous Flow Condition. *Water Air Soil Pollut* 224, 1543. <https://doi.org/10.1007/s11270-013-1543-z>

7. Table des illustrations

Figure 1. Evolution temporelle du nombre cumulé de filtres plantés de roseaux (en rouge) et du nombre de constructions par an (histogramme). Les données de 82 stations ont été ignorées car la date de mise en service était antérieure à 1987. (données 2018).....	9
Figure 2. Nombre de filtres plantés de roseaux de capacité supérieure à 200 équivalent-habitants par département (données 2018).....	10
Figure 3. Nombre de filtres plantés de roseaux de capacité supérieure à 200 équivalent-habitants par bassin (données 2018).....	10
Figure 4: Pyramide des âges des FPR (données 2018).....	10
Figure 5. Début d'alimentation sur un filtre neuf.....	12
Figure 6. Distribution volumique de taille de particules en entrée de 5 stations (800 EH < capacité < 2000 EH). Source : (Masson <i>et al.</i> , 2019).....	12
Figure 7. Phénomène de filtration en profondeur sur le 1 ^{er} étage de FPR.....	12
Figure 8. Formation d'un gâteau de filtration à la surface du filtre.....	13
Figure 9. Mise en place du dépôt de surface et croissance du biofilm dans le massif filtrant au cours de la phase d'alimentation.....	13
Figure 10. Réduction de la taille du biofilm et déshydratation du dépôt de surface pendant la phase de repos.....	13
Figure 11. Evolution théorique de l'accumulation des dépôts de surface et au sein du massif filtrant au cours du temps.....	15
Figure 12. Lames minces réalisées sur des échantillons non remaniés du massif filtrant d'un premier étage de FPR. Le dépôt est visible en marron et les graviers en gris clair.....	15
Figure 13. Phénomène de décompaction du massif, a) observé sur la station de Montromant (69) par tomographie de rayon X (marron : dépôt ; blanc : gravier, noir :air), b) théorique avec à gauche le massif filtrant originel et à droite sa modification sous l'action du dépôt. Remarque : la résolution de la tomographie de rayon X ne permet d'observer que la macroporosité (>40 µm).....	16
Figure 14. Nématodes présents dans le dépôt de surface (observation microscopique après dilution, grossissement : 125).....	17
Figure 15. (à gauche) Nombre de publications par année, (à droite) répartition des sources entre FPR à écoulement vertical ou horizontal.....	18
Figure 16. Formation d'une couche colmatante (beige clair) parfois appelée <i>slime</i> au-dessus du dépôt de surface.....	20
Figure 17: Nombre total de réponses et nombre de réponses complètes au sondage.....	23
Figure 18. Emplacement des stations étudiées.....	24
Figure 19: Nombre de stations suivant le nombre de bilans 24 heures disponibles par station (parmi les 49 stations étudiées).....	25
Figure 20: Charges hydraulique (à gauche) et organique (à droite). Le trait rouge représente les valeurs usuellement prises pour le dimensionnement. Les points représentent les charges mesurées	

sur les stations étudiées (chaque couleur correspond à une station). La boîte à moustache représente la distribution des valeurs des charges sur les premiers étages de l'ensemble des stations pour lesquelles nous disposons de bilans 24 heures dans PlanteDefi. Les limites hautes et basses correspondent aux 1^{er} et 3^{ème} quartiles respectivement, la ligne pleine entre-elles correspond à la médiane et la ligne pointillée à la moyenne.....25

Figure 21: Accumulation de solides (lié à l'activité biologique et au dépôt de MES) sur le premier étage de filtres planté de roseaux. Fréquence (en haut) et mesures indépendantes (en bas). En gris, l'ensemble des résultats de la base de données PlanteDefi et en vert les stations de l'étude.....26

Figure 22: A gauche, charge en MES entrante en fonction du ratio DCO/MES pour l'ensemble des stations pour lesquelles nous disposons de bilans 24 heures (en gris) ainsi que pour les stations mises en avant dans l'étude (en vert). La ligne horizontale rouge correspond à la valeur de dimensionnement usuellement retenue et la ligne verticale pointillée représente la valeur moyenne du ratio DCO/MES pour des effluents d'entrée en zone rurale (Mercoiret, 2009). A droite, comparaison des distributions du ratio DCO/MES entre les bilans des filtres de l'étude et l'ensemble des bilans 24 heures de PlanteDefi.....27

Figure 23: Causes probables des dysfonctionnements. SD : sous-dimensionnement, SH : surcharge hydraulique.....28

Figure 24. Diagramme des causes de dysfonctionnements pouvant entraîner un colmatage.....29

Figure 25. Nombre de FPR mis en service par an tel qu'indiqué dans les bases de données d'autosurveillance de 2014, 2015 et 2016.....37

Tableau 1. Listes des mesures utilisées pour caractériser le colmatage.....18

Tableau 2. Les sources du colmatage.....19

Tableau 3: Techniques de remédiation (Du *et al.*, 2016 ; Hua *et al.*, 2010 ; Miranda *et al.*, 2016 ; Nivala *et al.*, 2012).....21

8. Annexe 1 : Remarque sur la base de données d'auto-surveillance

La fiabilité des informations présentes dans la base de données d'auto-surveillance pour les installations de moins de 2 000 équivalent-habitants est faible. Dans cette étude, nous avons mis en évidence :

- L'absence d'un certain nombre de station, ces dernières sont régulièrement ajoutées à la base de données.
- Des informations erronées notamment sur l'âge des installations.

8.1. Une base de données en évolution constante

D'une année sur l'autre, la base de données est mise à jour en incluant non seulement les nouvelles stations, mais également les stations anciennement non répertoriées. Ainsi, lorsque l'on compare les données de trois bases de données successives (2014, 2015, 2016), on remarque que le nombre de station pour les années antérieures à 2014 diffère d'une base à l'autre (Figure 25).

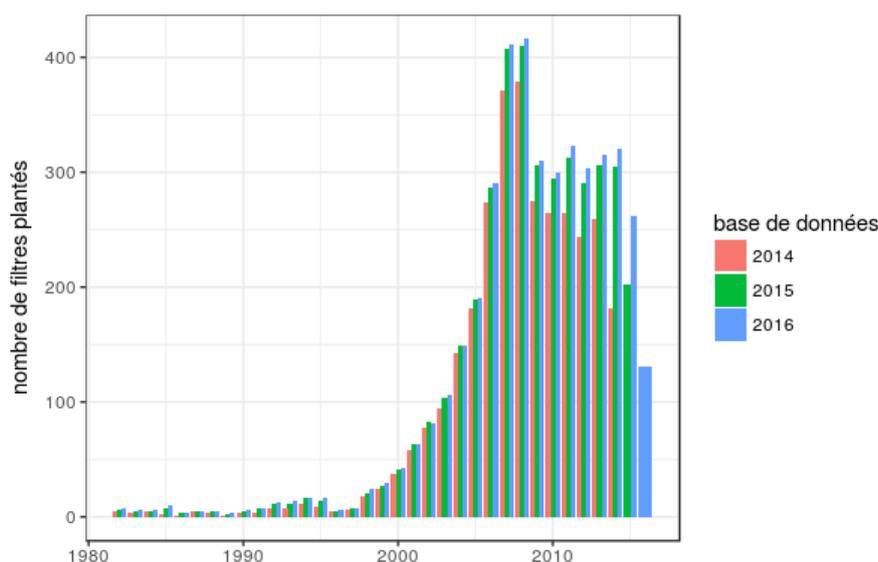


Figure 25. Nombre de FPR mis en service par an tel qu'indiqué dans les bases de données d'auto-surveillance de 2014, 2015 et 2016.

Cette information est importante à prendre en compte, notamment pour éviter une mauvaise interprétation des tendances. Le nombre de FPR construit l'année J-1 (avec J l'année de publication de la base de données) est souvent sous-estimé pouvant faire croire à une inflexion soudaine du nombre de construction.

8.2. Des dates de mise en service erronées

Dans la base de données de 2016, l'année de mise en service la plus ancienne correspondant à une installation de type FPR est 1963. Or les premières expériences de FPR sur des installations tailles réelles n'ont démarré que dans les années 1980 (Liénard, 2010). Cette date de mise en service correspond à la station d'Auzas (31) et après renseignement pris auprès du SATESE, cette dernière a été mise en service en juin 2003.

Dans la base de données, l'année de mise en service de la station de Gensac-la-Pallue (16) est 1982 alors que Liénard (2010) indique une mise en service en 1987.

9. Annexe 2 : liste des stations de traitement des eaux usées de type filtres plantés de roseaux de plus de 25 ans d'après la base de données de l'autosurveillance.

Liste des stations de plus de 25 ans d'après la base de données d'autosurveillance. En gris, les stations pour lesquelles l'information n'a pu être vérifiée à l'aide de PlanteDéfi; en vert, les stations pour lesquelles la date de mise en service est identique dans les deux bases de données. En orange, les stations dont la date de mise en service est plus récente dans PlanteDéfi.

Code du STEU	Nom du STEU	Date de mise en service du STEU (base autosurveillance)	Date de mise en service du STEU (base PlanteDéfi)
06090110001	COLOMIEU	01/01/94	01/01/94
0403063S0002	CHASSENARD - BOURG	01/01/90 Non renseignée	
0403135S0001	LALIZOLLE - CD 284 - RTE DE BOËNAT	07/01/89 Non renseignée	
0403212S0001	QUINSSAINES - BOURG	02/01/89 Non renseignée	
0403232S0001	SAINT-FELIX - BOURG	12/31/87	12/31/87
060907185001	PREAUX	03/01/92 Non renseignée	
060926193001	MONTBRUN LES BAINS	01/01/90 Non renseignée	
060938198001	JARCIEU	12/01/94 Non renseignée	
0443112S0004	LANGEAC-CHADERNAC	01/01/92	01/01/92
0463015S0002	AUBUSSON-D'AUVERGNE BOURG	06/28/90	06/01/07
060973096002	CRUET SAINT-LAURENT	01/01/92 Non renseignée	
060969130001	MEAUX LA MONTAGNE	01/01/94	01/01/92
060969138001	MONTROMANT	01/01/94	01/01/94
060973097001	CURIENNE CHEF LIEU	06/01/93	06/01/93
060973240001	SAINTE HELENE DU LAC CHEF LIEU	01/01/92	01/01/92
060925268001	GERMEFONTAINE	12/31/88 Non renseignée	
060925466001	POUILLEY-FRANCAIS	12/31/89 Non renseignée	
060939404001	PANNESSIERES	12/31/92	12/31/92
0458152S0001	MAGNY-COURS LAGUNAGE	07/01/91 Non renseignée	
060970215001	ERREVET	12/31/93	12/31/93
060971087001	CHAPAIZE - BESSUGE	01/01/92 Non renseignée	
0471141S0001	COLOMBIER-EN-BRIONNAIS BOURG	12/31/87 Non renseignée	
060971277004	MARCILLY-LES-BUXY LE MARTRAT - LES COULO	12/31/94 Non renseignée	
060971460003	ST-MAURICE-DE-SATONNAY SATONAY	12/31/93 Non renseignée	
0422014S0001	BOURSEUL ROUTE DE CORSEUL	01/01/94	01/01/94
0422053S0001	EREAC RTE DE SEVIGNAC-MOULLERAIE'	10/31/92	10/31/92
0422140S0001	LA MALHOURS LA MÉRISSE	09/30/91	09/30/91
0435018S0001	BAZOUGE-DU-DESERT	01/01/91 Non renseignée	
0435157S0001	LE LOROUX	01/01/87 Non renseignée	
0435300S0001	SAINT-MHERVE	01/01/92 Non renseignée	
0456024S0002	BREHAN-MOULIN DE JÉGU	12/31/93 Non renseignée	
0456213S0002	SAINT-GERAND CORN ER PONT	09/01/93 Non renseignée	
0441102S0001	HOUSSAY	10/01/93	10/01/93
026807700840	EGLINGEN ALLMENDGRABEN	07/01/94	07/01/94
026807700839	EGLINGEN NIEDERFELD	07/01/94	07/01/94
026810700747	GOMMERSDORF	07/01/93	07/01/93
026820000841	MANSPACH	07/01/94	07/01/94
037716301000	DOUY LA RAMEE	12/31/88	12/31/88
037736001000	PEZARCHES	12/31/91	12/31/91
035037601000	NICORPS	12/31/94	12/31/94
035042901000	REGNEVILLE-SUR-MER	12/31/93 Non renseignée	
035044301000	SACEY	12/31/94	12/31/94
035051001000	SAINT-MARTIN-D'AUBIGNY EGLISE	12/31/91 Non renseignée	
035057001000	SAVIGNY-LE-VIEUX	12/31/94 Non renseignée	
037600701000	ANCEAUMVILLE	12/31/88	01/01/07
037608601000	BERTRIMONT	12/31/90	12/31/90
037623901000	EPRETOT	12/31/93	12/31/93
037633201000	GRUMESNIL	12/31/91 Non renseignée	
0519045V001	LA-CHAPPELLE-SAINT-GERAUD	12/31/90	12/31/90
0519051V002	CHAUMAIL	12/31/87	12/31/87
0519173V004	RILHAC-XAINTRIE-EYBRET	12/31/92 Non renseignée	
0519173V003	RILHAC-XAINTRIE-ROLIERE	12/31/92 Non renseignée	
0519258V009	SERVIERES-LE-CHATEAU-LE-RIEUX	12/31/94 Non renseignée	
0524534V001	SIGOULES	07/01/87	07/01/87
0479135S0001	GOURGE BOURG	07/01/88 Non renseignée	
0486124S0001	LAVOUX	01/01/92 Non renseignée	
0486125S0001	LEIGNÉ LES BOIS BOURG	01/01/92 Non renseignée	
0486138S0001	LUCHAPT	01/01/88 Non renseignée	
0486167S0001	MONT S SUR GUESNES	01/01/89 Non renseignée	
0486259S0001	SENILLE	06/01/93	06/01/93
0486275S0001	USSEAU	01/01/92	01/01/92
0486299S0001	VOUZAILLES	01/01/93 Non renseignée	
060930062005	CALVISSON SINSANS	01/01/90	01/01/10
0532057V001	BLAZIERT	01/01/92	01/01/92
0532315V001	PEYRUSSE-GRANDE	01/01/91	01/01/91
060934162002	MONTAGNAC-BESSILLE	02/01/89 Non renseignée	
060934263002	SAINT HILAIRE DE BAUVOIR- BOURG	09/01/93	09/01/93
060934273001	ST MARTIN DE L'ARCON	01/01/94 Non renseignée	
060934304001	SOUBES	07/01/91 Non renseignée	
0582030V001	CASTELFERRUS (OUEST)	12/01/94 Non renseignée	
0449161S0001	LA JAILLE-YVON - BOURG	01/01/92 Non renseignée	
0449185S0001	LUE-EN-BAUGEOIS	02/01/91 Non renseignée	
0485192S0001	ROCHETREJOUX LA BAUDIÈRE	01/01/88	01/01/88
0485282S0001	SIGOURNAIS	02/01/88	02/01/88
060904144003	PALUD (LA)VILLAGE	01/01/92 Non renseignée	
060984015002	BEAUMONT DU VENTOUX VILLAGE	12/31/93 Non renseignée	

Remarque de Pascal Bourdoncle (SATESE 82) : la station de Castelferrus Ouest est répertoriée comme un FPR, mais en fait il s'agit d'une filière filtre à sable.

10. Annexe 3 : retour sur le vieillissement des Filtres Plantés de Roseaux (FPR)

L'objectif de cette étude est d'identifier les FPR rencontrant des dysfonctionnements et de retracer l'historique de ces derniers afin d'en établir les causes. Cette étude se déroule dans le cadre du groupe de travail EPNAC et est financée par l'AFB.

Après 30 ans de développement, la filière FPR continue son développement en France. La majorité des stations ayant été construite après 2000, nous ne disposons cependant que d'un retour d'expérience limité sur le vieillissement de la filière. Afin d'optimiser la durée de vie des installations et d'anticiper au mieux le pic de renouvellement à venir, nous avons souhaité recueillir le plus d'informations possibles sur le vieillissement de ces filières et les éventuels dysfonctionnements observés.

L'objectif de cette étude, financée par l'AFB, est d'identifier les sites rencontrant des dysfonctionnements et de retracer l'historique de ces derniers afin d'en établir les causes.

Merci donc de ne renseigner que les stations sur lesquelles vous rencontrez ou avez rencontré des difficultés et de remplir un questionnaire par station.

Les résultats de cette étude orienteront nos travaux de recherche à venir dans le cadre du programme WetClog qui vise à mieux comprendre comment la matière organique s'accumule et se dégrade dans les filtres plantés et comment la gestion de ces derniers modifie ces processus. Je vous remercie par avance pour vos contributions et me tiens à votre disposition pour toute question : nicolas.forquet@irstea.fr

Nicolas Forquet

Il y a 38 questions dans ce questionnaire.

Votre nom : *

Veuillez écrire votre réponse ici :

Ces informations resteront confidentielles

Votre prénom *

Veuillez écrire votre réponse ici :

Ces réponses resteront confidentielles

Votre adresse électronique : *

Veuillez écrire votre réponse ici :

Ces informations resteront confidentielles

Votre organisme de rattachement : *

Veuillez écrire votre réponse ici :

Nom de la station concernée *

Veuillez écrire votre réponse ici :

Code SANDRE de la station : *

Veuillez écrire votre réponse ici :

Adresse ou coordonnées GPS

Veuillez écrire votre réponse ici :

Date de mise en service

Veuillez écrire votre réponse ici :

constructeur

Veillez écrire votre réponse ici :

Type de réseau

Veillez sélectionner une réponse ci-dessous

Veillez sélectionner une seule des propositions suivantes :

- Unitaire
- Séparatif

Présence d'un dégrilleur ?

Veillez sélectionner une seule des propositions suivantes :

- Oui
- Non

Entrefer (mm) :

Répondre à cette question seulement si les conditions suivantes sont réunies :

La réponse était 'Oui' à la question '11 [Fil_1]' (Présence d'un dégrilleur ?)

Seuls des nombres peuvent être entrés dans ce champ.

Veillez écrire votre réponse ici :

-

Prétraitement

Veillez sélectionner une réponse ci-dessous

Veillez sélectionner une seule des propositions suivantes :

- Déssableur
- Dégraisseur
- Décanteur/Digesteur
- Fosse toutes eaux
- Aucun

Etage 1

Veillez sélectionner une réponse ci-dessous

Veillez sélectionner une seule des propositions suivantes :

- Horizontal
- Filtre vertical non saturé (système classique)
- Filtre vertical non saturé étage 1 et 2 superposés
- Filtre vertical non saturé/saturé

Pour la filière non saturée/saturée, se reporter au document suivant : http://epnac.irstea.fr/wp-content/uploads/2016/03/20160311_Note_Filtre_vertical_NS-S-vfinale.pdf

Nombre total de filtres du premier étage :

Seuls des nombres peuvent être entrés dans ce champ.

Veillez écrire votre réponse ici :

-

Nombre de filtres fonctionnant simultanément

Seuls des nombres peuvent être entrés dans ce champ.

Veillez écrire votre réponse ici :

-

Surface individuelle des filtres (m²)

Seuls des nombres peuvent être entrés dans ce champ.

Veuillez écrire votre réponse ici :

•

Type d'alimentation

Veuillez sélectionner une réponse ci-dessous

Veuillez sélectionner une seule des propositions suivantes :

- Chasse / siphon
- Pompe
- Fil de l'eau

Nombre de couche de matériaux

Seuls des nombres peuvent être entrés dans ce champ.

Veuillez écrire votre réponse ici :

•

Etage 2

Veuillez sélectionner une réponse ci-dessous

Veuillez sélectionner une seule des propositions suivantes :

- Horizontal
- Filtre vertical non saturé (système classique)
- Filtre vertical non saturé/saturé

Nombre total de filtres du deuxième étage :

Répondre à cette question seulement si les conditions suivantes sont réunies :

La réponse n'était PAS à la question '20 [Fil_10]' (Etage 2)

Seuls des nombres peuvent être entrés dans ce champ.

Veuillez écrire votre réponse ici :

•

Nombre de filtres fonctionnant simultanément

Répondre à cette question seulement si les conditions suivantes sont réunies :

La réponse n'était PAS à la question '20 [Fil_10]' (Etage 2)

Seuls des nombres peuvent être entrés dans ce champ.

Veuillez écrire votre réponse ici :

•

Surface individuelle des filtres (m²)

Répondre à cette question seulement si les conditions suivantes sont réunies :

La réponse n'était PAS à la question '20 [Fil_10]' (Etage 2)

Seuls des nombres peuvent être entrés dans ce champ.

Veuillez écrire votre réponse ici :

•

Type d'alimentation

Répondre à cette question seulement si les conditions suivantes sont réunies :

La réponse n'était PAS à la question '20 [Fil_10]' (Etage 2)

Veillez sélectionner une réponse ci-dessous

Veillez sélectionner une seule des propositions suivantes :

- Chasse / siphon
- Pompe
- Fil de l'eau

Nombre de couche de matériaux

Répondre à cette question seulement si les conditions suivantes sont réunies :

La réponse n'était PAS à la question '20 [Fil_10]' (Etage 2)

Seuls des nombres peuvent être entrés dans ce champ.

Veillez écrire votre réponse ici :

•

Etage 3

Veillez sélectionner une réponse ci-dessous

Veillez sélectionner une seule des propositions suivantes :

- Horizontal
- Filtre vertical non saturé (système classique)
- Filtre vertical non saturé/saturé

Nombre total de filtres du troisième étage :

Répondre à cette question seulement si les conditions suivantes sont réunies :

La réponse n'était PAS à la question '26 [Fil_16]' (Etage 3)

Seuls des nombres peuvent être entrés dans ce champ.

Veillez écrire votre réponse ici :

•

Nombre de filtres fonctionnant simultanément

Répondre à cette question seulement si les conditions suivantes sont réunies :

La réponse n'était PAS à la question '26 [Fil_16]' (Etage 3)

Seuls des nombres peuvent être entrés dans ce champ.

Veillez écrire votre réponse ici :

•

Surface individuelle des filtres (m²)

Répondre à cette question seulement si les conditions suivantes sont réunies :

La réponse n'était PAS à la question '26 [Fil_16]' (Etage 3)

Seuls des nombres peuvent être entrés dans ce champ.

Veillez écrire votre réponse ici :

•

Type d'alimentation

Répondre à cette question seulement si les conditions suivantes sont réunies :

La réponse n'était PAS à la question '26 [Fil_16]' (Etage 3)

Veillez sélectionner une réponse ci-dessous

Veillez sélectionner une seule des propositions suivantes :

- Chasse / siphon

- Pompe
- Fil de l'eau

Nombre de couche de matériaux

Répondre à cette question seulement si les conditions suivantes sont réunies :
La réponse n'était PAS à la question '26 [Fil_16]' (Etage 3)

Seuls des nombres peuvent être entrés dans ce champ.

Veuillez écrire votre réponse ici :

•

Comment sont effectuées les alternances ?

Veuillez sélectionner une réponse ci-dessous

Veuillez sélectionner une seule des propositions suivantes :

- Automatiquement
- Manuellement

Quelle est la fréquence d'alternance ?

Seuls les nombres sont acceptés.

Veuillez écrire votre(vos) réponse(s) ici :

- Nombre de jours de repos
- Nombre de jours d'alimentation

Existe-t-il un registre où sont consignés les dates auxquelles les alternances sont effectuées ?

Veuillez sélectionner une réponse ci-dessous

Veuillez sélectionner une seule des propositions suivantes :

- Oui
- Non

L'exploitant modifie-t-il ces fréquences en fonction du fonctionnement de la station ?

Veuillez sélectionner une réponse ci-dessous

Veuillez sélectionner une seule des propositions suivantes :

- Oui
- Non

Quels paramètres sont pris en compte pour effectuer cet ajustement ?

Répondre à cette question seulement si les conditions suivantes sont réunies :

La réponse était 'Oui' à la question '35 [Ges_4]' (L'exploitant modifie-t-il ces fréquences en fonction du fonctionnement de la station ?)

Veuillez écrire votre réponse ici :

Détails des dysfonctionnements

Date	Problème observé	Evènement exceptionnel associé	Solution mise en oeuvre	Existe-t-il des documents concernant cet évènement ? (photos, rapport, ...)
------	------------------	--------------------------------	-------------------------	---

Les documents peuvent être transmis par e-mail à l'adresse suivante : nicolas.forquet@irstea.fr

Commentaires libres

Veuillez écrire votre réponse ici :

Nous vous remercions de votre participation à cette enquête nationale sur le vieillissement des FPR.

Nous vous rappelons que chaque SATESE est sollicité pour remplir un questionnaire par station de son département présentant un intérêt dans le cadre de cette enquête. Vous serez tenus informés des résultats de l'enquête dès leur parution sur le site epnac.irstea.fr. Les informations sur les stations seront rendus anonymes. Nous vous remercions encore pour votre contribution.

L'équipe EPURE (Centre Irstea Lyon-Villeurbanne)

10/11/2017

–

04:51

Envoyer

votre

questionnaire.

Merci d'avoir complété ce questionnaire.

11. Remerciements

Je tiens à remercier l'ensemble des personnels des SATESE qui ont pris le temps de répondre à ce questionnaire ainsi que ceux qui participent à l'enrichissement de la base de données PlanteDéfi.

Je tiens également à remercier Noël De Bernardo de la Communauté de Communes du Pays de Cruseilles (74) qui m'a permis d'accéder aux stations de sa collectivité.



1, rue Pierre-Gilles de Gennes
CS 10030
92761 Antony Cedex
01 40 96 61 21
www.irstea.fr

**AGENCE FRANÇAISE
POUR LA BIODIVERSITÉ**
ÉTABLISSEMENT PUBLIC DE L'ÉTAT

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