

Suivi de l'abattement des pathogènes dans un filtre planté horizontal aéré

Diana Le Berre¹, Marion Casanova¹, Olivier Garcia¹, Rémi Lombard-Latune¹, Jaime Nivala¹

¹ INRAE, UR REVERSAAL, Villeurbanne, auteur correspondant : diana.le-berre@inrae.fr

INTRODUCTION

Pour faire face aux défis que représente l'adaptation aux changements climatiques, le gouvernement a choisi d'initier sa « planification écologique » par le secteur de l'eau. Le « Plan Eau » annoncé en mars 2023 se compose d'une série de mesures visant à redéfinir la politique de gestion de l'eau. L'axe « optimisation de la disponibilité de la ressource » intègre le sujet de la réutilisation des eaux usées traitées (REUT), avec l'ambition de développer 1 000 projets d'ici 2028. Un an plus tard, les premiers effets pourraient commencer à se faire sentir puisque s'il y avait 4 projets de REUT en fonctionnement de plus en 2022 par rapport à 2017 (EPNAC, 2023)ⁱ, il y en aurait eu 12 de plus entre mars 2023 et mars 2024 (Ministères Écologie Énergie Territoire, 2024)ⁱⁱ.

Cependant, le développement massif de la REUT pourrait également avoir des répercussions négatives sur l'environnement. En effet, les émissions des services d'eau et d'assainissement représentent 3 à 7 % des émissions de gaz à effet de serre (GES) des villes (Alix et al., 2022)ⁱⁱⁱ. De plus, les solutions physiques ou chimiques de traitements des eaux usées ont des besoins énergétiques importants et des solutions alternatives doivent être trouvées. Les solutions fondées sur la nature pour le traitement de l'eau, en particulier, les filtres plantés de roseaux ont donc un rôle clé à jouer. Ils sont économes en énergie, leurs performances sont stables, robustes aux variations de charges et leur entretien nécessite une faible technicité (Epnac, 2014)^{iv}. Cependant, leurs performances sont limitées au niveau microbiologique, de l'ordre de 1 à 2 unités log par étage de traitement. Mais l'ajout d'une aération forcée en fond de filtre semble favoriser l'élimination d'*Escherichia coli* (Nivala et al., 2019)^{iv} et permettre d'atteindre 4 log d'abattement dans le cas d'un filtre planté à écoulement horizontal aéré. Bien qu'*E. coli* soit largement utilisé comme indicateur de suivi en routine des performances sur les microorganismes, il ne peut pas être considéré comme représentatif de l'ensemble des types de germes pathogènes. Une étude sur un pilote expérimental a permis d'étudier les performances de tels procédés sur les autres types de microorganismes (virus, protozoaires, helminthes).

MATERIELS ET METHODES

Durant l'étude, un pilote de la plateforme expérimentale REFLET située au nord-ouest de Lyon (France) a été utilisé. Il s'agit d'un filtre horizontal aéré d'une surface de 20m², le système est de 4 m de large sur 5 m de long et est saturé sur une profondeur de 1m (Figure 1). Le lit est composé de gravier de 20 à 40 mm avec une porosité théorique de 40%. L'aération est permanente et la charge hydraulique moyenne sur la durée de l'étude est de 1220L/j avec un temps de séjour théorique de 5 j ce qui correspond à la charge nominale du procédé.

Des échantillons ont été prélevés dans les différents points du filtre : en entrée (eaux usées après traitement primaire par décantation), en Mid 1 (témoin de l'efficacité du traitement du 1^{er} quart du filtre), en Mid 2 (témoin de l'efficacité du traitement du 2nd quart du filtre), en Mid 3 (témoin de l'efficacité du traitement du 3^{ème} quart du filtre) et en sortie (témoin de l'efficacité globale de traitement). Sur ces échantillons des analyses ont été réalisées une à deux fois par semaine de mars à août 2024 sur les paramètres microbiologiques suivant :

- Bactéries : *Escherichia coli*, coliformes totaux, entérocoques fécaux, *Legionella pneumophila*
- Virus : bactériophage ARN-F spécifiques
- Protozoaire : spores de bactéries anaérobies sulfite-réductrices
- Helminthes : œufs d'*Ascaris*

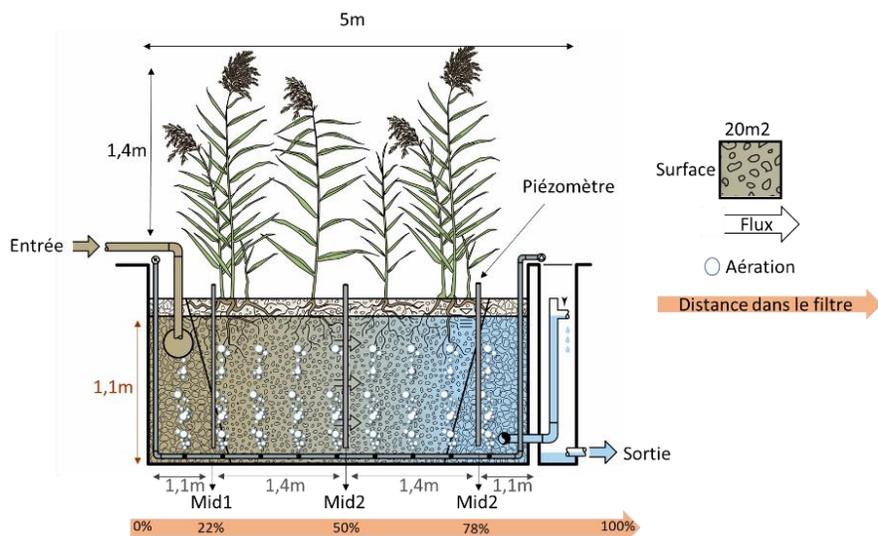


Figure 1: Présentation du filtre horizontal aéré de la plateforme de recherche REFLET.

Ces analyses permettent d'étudier les capacités d'abattement des différents types de microorganismes sur le filtre planté. Les concentrations en *Escherichia coli* et en coliformes totaux ont été mesurées grâce à la méthode de quantification colorimétrique IDEXX avec le réactif Colilert 18. Les concentrations en spores de bactéries anaérobies sulfito-réductrice ont été mesurées par un laboratoire d'analyse prestataire par filtration sur membrane selon la norme NFEN 26461-2. L'analyse d'autres paramètres comme les concentrations en *Legionella pneumophila* ainsi que les bactériophages à ARN F n'ont pas pu être obtenus suite à un défaut du prestataire.

Lors de l'échantillonnage des mesures ponctuelles des paramètres physico-chimiques suivants ont été réalisés : pH, conductivité, potentiel rédox, oxygène dissout et température. Sur les échantillons, les paramètres chimiques majeurs ont été analysés : demande chimique en oxygène brute (DCOb), matière en suspension (MES), carbone organique total (COT), azote total (NT) et azote Kjeldahl (NKJ).

RESULTATS

Les paramètres physico-chimiques liés à la qualité de l'eau ont été mesurés selon les normes en vigueur NFENISO 15705 et NFEN 872. Les résultats sont présentés en Tableau 1.

Tableau 1 : moyennes des paramètres physico-chimiques et majeurs mesurés dans les différents quarts du filtre horizontal aéré. *n* correspond au nombre de campagnes. Les échantillons mesurés en deçà de la limite de détection (0,02) sont notés LD.

Paramètre	DCO b	MES	COT	NT	NKJ	NH4-N	NO3-N	NO2-N	PO43-	Concentration <i>E.coli</i>	Concentration <i>Coliformes totaux</i>	Potentiel rédox	pH	Température
Unité	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	log10	log10	mV	-	°C
<i>n</i>	3	6	6	6	3	6	6	6	6	10	10	10	10	10
Entrée	616	380	264	136	105,7	90,5	0,5	0,1	4,1	6,5	7,6	-256	6,8	23,7
Mid 1	154,7	397	65	51,7	33,2	23,6	16,5	0,4	4,1	4,3	5,5	74	7,4	24,1
Mid 2	20	6	8	39,2	1	LD	34,3	0,1	3,7	3	4,6	89	8	23,8
Mid 3	20	3	8	39,1	1	LD	34,4	0,1	3,4	2,5	5	92	8,2	23,5
Sortie	23,3	7	8	39,5	1,1	LD	34,6	0,1	3,4	2,5	4,5	92	8,1	23,5

Le pilote présente de très bonnes performances de traitement sur les paramètres physico-chimiques. On observe un abattement des MES global de 97% avec la plus grande partie (plus de 98%) de l'abattement ayant lieu dans la première moitié du filtre. 93% de la matière organique est abattue dans le filtre cela correspond à l'élimination du carbone et de la DCO. L'azote total est abattu à 70% avec une nitrification complète (NH4 inférieur aux limites de

détection). Enfin le phosphore est éliminé à 14% en sortie de filtre, ce qui est une valeur moyenne d'abattement du phosphore dans un filtre planté. Globalement les performances d'abattement du filtre horizontal aéré sont très bonnes sur la matière organique ainsi que sur les paramètres physico-chimiques.

Afin d'étudier les performances du filtre horizontal aéré sur les pathogènes, les concentrations en microorganismes bactériens ont été mesurées (Figure 2). Les trois indicateurs présentés sont : *Escherichia coli* bactérie gram négative classiquement utilisée pour la mesure des performances en traitement des eaux, les coliformes totaux qui sont un rassemblement d'entérobactéries. *Escherichia coli* appartenant à la famille des coliformes totaux cette mesure forme un contrôle de méthode, car la concentration en *E.coli* est toujours inférieure à la concentration en coliformes totaux. Et enfin les spores de bactérie anaérobies sulfito-réductrice qui sont un modèle d'abattement des protozoaires. Ils ont des propriétés de filtration semblable aux kystes de protozoaire et servent dans ce sens d'indicateur de l'élimination des kystes beaucoup plus difficiles à mesurer. La concentration moyenne en bactérie est de 6,5 unités log en entrée et de 4,5 unités log en Mid 1 donc 65% de l'abattement à lieu après le premier quart du filtre, et n'évolue que faiblement dans la seconde partie du filtre (0,5 log d'abattement en moyenne dans la seconde moitié). Pour les coliformes totaux, les mêmes tendances sont observées (fort abattement dans le premier quart, moindre dans le second et limitée dans la seconde moitié du filtre), avec une concentration moyenne de 6,5 unités log en entrée et de 4,5 unités log en point Mid 1. L'abattement dans le second quart est un peu plus faible (0,5 contre 1 log en moyenne), l'abattement global est de ce fait plus limité. Les spores de bactéries anaérobies sulfito-réductrice quant à elles sont éliminées de manière plus linéaire tout au long du filtre et passent de 5 log en entrée à 4 (Mid 1), puis 3 (Mid 2), et enfin 2,5 log (Mid 3 et sortie). Ces différences dans les performances et l'efficacité des différentes parties du filtre suggèrent que des mécanismes différents sont impliqués dans l'abattement des différents types d'indicateurs microbiologiques.

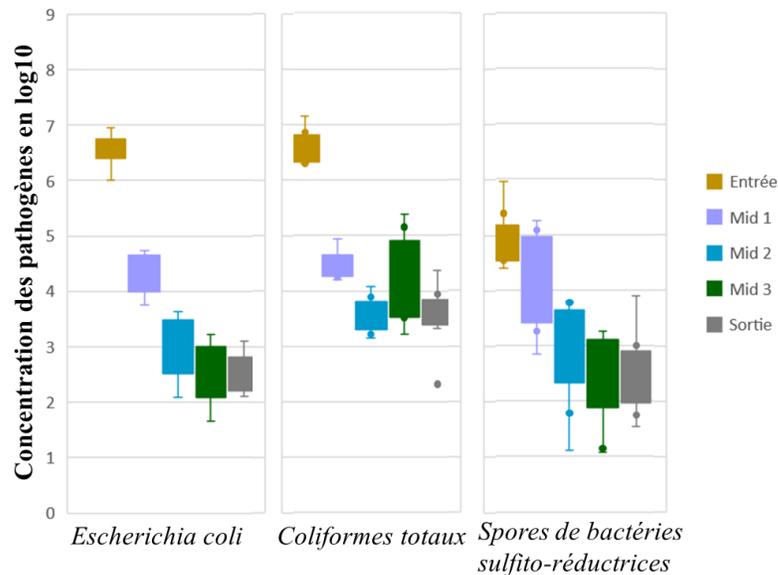


Figure 2 : concentration en log₁₀ des pathogènes dans les différents quarts du filtre horizontal aéré

Grâce aux concentrations mesurées, on observe un abattement de total de 4 unités log en moyenne pour *E.coli* et de 3 unités log pour les coliformes totaux. En accord avec la littérature, on observe que l'abattement le plus important s'effectue dans le premier quart que filtre (entre l'entrée et le point Mid 1) malgré un abattement des coliformes moins important. L'abattement des spores de bactérie anaérobies sulfito-réductrice est en moyenne de l'ordre de 2.5 unités log avec une élimination homogène entre les quarts du filtre. Les autres paramètres n'ont pas pu être analysés par les prestataires et ne sont pas présentés ici.

DISCUSSION

Afin d'augmenter la REUT lié aux eaux traitées, l'élimination des pathogènes dans un filtre horizontal aéré a été analysé. Ainsi nous avons pu déterminer la qualité de l'eau du pilote utilisé en lien avec l'arrêté français de 2023 sur la REUT agricole. Dans 80% des campagnes l'eau prélevée en sortie pourrait correspondre à une classe B de traitement en concentration et en abattement selon la réglementation présentée en Tableau 2. Les 20% restant correspondent à une classe C car les concentrations *E.coli* notamment ne sont pas inférieures au seuil indiqué malgré un bon abattement global.

Tableau 2 : seuil de qualité pour la réutilisation des eaux traitées définis par l'arrêté français de 2023

	A	B	C	D
MES (mg/L)	< 10	Conforme DERU		
DBO ₅ (mgO ₂ /L)	< 10	Conforme DERU		
<i>Escherichia coli</i> (nombre / 100 mL)	< 10 (≥ 5 log)	< 100 (≥ 3 log*)	< 1 000 (≥ 2 log*)	< 10 000 (≥ 2 log*)
Coliphages totaux (Bacteriophages ARN F-spezifiques ou Phages somatiques)	< 10 (≥ 6 log)	< 100 (≥ 3 log*)	< 1 000 (≥ 2 log*)	< 10 000 (≥ 2 log*)
<i>Clostridium Perfringens</i> (ou Spores de bactéries anaérobies sulfito-réductrices)	< 10 (≥ 4 Log C.P. 5 log SBASR)	< 100 (≥ 3 log*)	< 1 000 (≥ 2 log*)	< 10 000 (≥ 2 log*)
<i>Legionella</i> spp	< 1 000 UFC/L lorsqu'il existe un risque de formation d'aérosol			
Œufs d'Helminthes	≤ 1 œuf /L pour l'arrosage des pâturages ou des fourrages frais			
Turbidité (NTU)	< 5	-	-	-

* Abattement attendu si usage sur cultures consommées crues dont la partie comestible est en contact direct avec l'eau.

Avec le développement de la REUT, il est nécessaire de mieux caractériser les performances des différents procédés de traitement. Afin d'avoir une idée précise des capacités de traitement, il est nécessaire d'analyser d'autres microorganismes tel que les virus (adénovirus ou virus à ARN) ayant des propriétés biologiques différentes des indicateurs précédemment utilisés. De plus, les différences de performance d'abattement en fonction du type de microorganismes, interrogent sur les autres paramètres impliqués dans l'élimination tel que les paramètres physiques (comme le dimensionnement des filtres ou encore la charge hydraulique) et chimique (tel que la proportion en azote par exemple).

CONCLUSION

Les performances du filtre horizontal aéré utilisées lors de l'étude montrent que l'abattement est poussé pour les paramètres physico-chimiques : 97% des MES avec une élimination à 93% de la matière carbonée dont 75% dans le premier quart du filtre. L'azote totale est éliminé à 70% et on observe une dénitrification complète. Les premiers résultats d'analyses des microorganismes nous confirment que les performances du filtre horizontal ne sont pas homogènes vis à vis des différents microorganismes. Le filtre horizontal aéré utilisé lors de l'étude permet un abattement de la bactérie *E. coli* en accord avec la littérature dans le premier quart du filtre mais un abattement en coliforme totaux (d'autres bactéries) moins important. De même, l'abattement des spores de bactéries anaérobies sulfito-réductrice semblent répondre à des mécanismes différents car les abattements sont linéaire le long les différents quarts. D'autres mesures sur les autres pathogènes réglementaire (tel que les entérocoques fécaux ou *Legionella pneumophila*) sont en cours de réalisation afin de préciser les performances du filtre.

ⁱ Panorama 2022 de la REUT en France. <https://www.epnac.fr/media/files/reut/panorama-reut-2022-epnac>

ⁱⁱ Dossier de Presse « Plan eau, 1 an après » [PLAN EAU, 1 an après \(ecologie.gouv.fr\)](https://www.ecologie.gouv.fr/plan-eau-1-an-apres)

ⁱⁱⁱ Réduire les émissions de gaz à effet de serre des services d'eau et d'assainissement: Aperçu des émissions et de leur potentiel de réduction illustré par le savoir-faire des services d'eau. <https://doi.org/10.2166/9781789063271>

^{iv} Guide d'exploitation des filtres plantés de roseaux. https://www.epnac.fr/media/files/filieres-de-traitement/filtres-plantés-de-roseaux/exploitation/guide-exploitation-fpr_epnac_2014

^v Side-by-side comparison of 15 pilot-scale conventional and intensified subsurface flow wetlands for treatment of domestic wastewater. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.165>