

Indicateurs de colmatage de filtres plantés de roseaux à écoulement vertical :

étude comparative de quatre stations de traitement après 10 ans de fonctionnement

■ P. BOIS¹, J. LAURENT¹, M. NUEL^{1,2}, A. WANKO¹

Mots-clés : traitement de l'eau, filtre planté de roseau, vieillissement, comportement hydraulique, expériences de terrain

Keywords: wastewater treatment, constructed wetland, ageing, hydraulic properties, field experiments

Introduction

La directive ERU (eaux résiduaires urbaines) de 1991 a rendu obligatoires les installations de traitement pour les communes de plus de 2 000 équivalent-habitant (EH) et a ainsi entraîné la création d'installations de traitement supplémentaires. Parmi elles, les procédés extensifs et en particulier les filtres plantés de roseaux (FPR) ont prouvé leur efficacité pour le traitement des eaux usées domestiques depuis plus d'une quinzaine d'années [BOUTIN *et al.*, 1997] et dans de nombreux pays [VYMAZAL, 2002]. Sur le bassin Rhin-Meuse, les stations de type FPR ont fait leur apparition au milieu des années 1990. Le recours à ce procédé de traitement est aujourd'hui en pleine expansion pour les petites collectivités : une dizaine de stations de ce type sont construites chaque année dans le bassin Rhin-Meuse, pour un total de 146 FPR actuellement recensés [AERM, 2013]. Au total, ce type de stations représente 27 % des STEU de moins de 2000 EH recensées sur le bassin hydrographique. Toutes les stations de type FPR implantées dans ce bassin sont conçues et exploitées selon le modèle français. Une station comprend ainsi deux étages en cascade, l'alimentation en effluent est intermittente (en général un tiers du temps en alimentation et deux

tiers du temps en repos) et par bâchées. Le granulat du premier étage est plutôt grossier pour éviter le colmatage et le granulat du second étage est plus fin ; l'écoulement de l'effluent est vertical sur les deux étages.

Parmi les stations de ce type recensées par l'agence de l'eau Rhin-Meuse (AERM), quatre sont en service depuis plus de 10 ans. Cette longévité et le nombre croissant d'installations de ce type posent les questions relatives à leur durée de vie et au nécessaire maintien des performances de traitement au cours de ce cycle de vie. En effet, le vieillissement des filtres plantés s'accompagne d'un certain nombre de phénomènes *a priori* indésirables, dont celui de colmatage, dû principalement aux phénomènes suivants [KADLEC et WALLACE, 2009] :

- dépôt de particules en suspension, surtout dans les horizons superficiels ;
- développement rapide d'un biofilm sur le support granulaire.

Le colmatage peut entraîner une diminution des performances de traitement par baisse de l'oxygénation des filtres colonisés jusqu'à un facteur 20 [PLATZER et MAUCH, 1997]. Il peut également arriver que l'accumulation de boues ne provoque pas de colmatage total, mais soit indésirable pour des raisons hydrauliques, notamment de répartition de l'effluent ou de conductivité hydraulique [MOLLE *et al.*, 2004]. On peut cependant remarquer que le vieillissement de ces

¹ Équipe MécaFlu, Laboratoire ICube – UMR 7357 CNRS/Engees/Unistra – 2, rue Boussingault – 67000 Strasbourg. Courriel : paul.bois@cube.unistra.fr
² Agence de l'eau Rhin-Meuse – Rue du Ruisseau – Rozérieulles – BP 30019 – 57161 Moulins-lès-Metz.

systèmes n'est pas forcément synonyme de dégradation des performances hydrauliques, comme l'ont remarqué CHAZARENC et MERLIN (2005). Il semble donc nécessaire de procéder à un suivi du vieillissement de ces systèmes, afin de s'assurer de la continuité de leur bon fonctionnement – hydraulique et épuratoire, ces deux aspects étant liés – au cours du temps.

Dans le cadre de cette étude, l'aspect hydraulique du vieillissement en lien avec le colmatage des filtres est étudié. Pour cela, une approche couplant expériences de terrain et de laboratoire a été adoptée : le comportement hydraulique, par l'intermédiaire de mesures de la vitesse d'infiltration [PEDESCOLL *et al.*, 2009], ainsi que la stratification verticale du granulat des quatre plus anciennes stations du bassin Rhin-Meuse ont été évalués sur le terrain. Un curage superficiel des parcelles échantillonnées a été réalisé pour simuler l'effet d'un curage des filtres ; cet effet a été repris en laboratoire lors de tests en éprouvette pour étudier l'évolution des vitesses d'infiltration au sein du massif filtrant. Cette évaluation est suivie par une

évaluation en laboratoire de paramètres physico-chimiques et structuraux (teneur en matière organique, porosité, granulométrie) du granulat prélevé dans les filtres, là encore afin d'apporter des éléments d'explications aux résultats hydrauliques obtenus. Ainsi, les objectifs de cette étude sont :

- rendre compte de l'état de vieillissement hydraulique – colmatage – des filtres plantés de roseaux à écoulement vertical (FPRv) équipant des petites communes après 10 ans de fonctionnement ;
- étudier l'impact d'un curage de filtre sur les vitesses d'infiltration relevées sur le terrain ;
- mettre ces résultats en perspective, notamment des caractéristiques de l'effluent d'entrée.

1. Matériel et méthodes

1.1. Choix des sites d'étude

Les quatre stations choisies pour l'étude sont des stations de traitement des eaux usées de type filtres plantés de roseaux à écoulement vertical (FPRv), situées sur le bassin Rhin-Meuse. Elles ont été choisies

	A			B			C			D		
Mise en service	1999			1999			1998			2002		
Débit journalier (m³/j)	105			150			40			12,5		
Débit de pointe (m³/h)	14			12,6			5			1,5		
Capacité (EH)	350			500			200			150		
Bassins par étage	3			3			3			3 (1 ^{er} étage) / 2 (2 ^e étage)		
Surface totale (m²)	E1	E2		E1	E2		E1	E2		E1	E2	
	668	496		474	518		375	255		190	128	
Lame d'eau (m/j)	0,68			0,67			0,32			0,95		
Porosité granulat (%)	E1F	E2F	E2Dr	E1F	E2F	E2Dr	E1F	E2F	E2Dr	E1F	E2F	E2Dr
	46	48	44	37	40	38	54	69	nd	66	43	56
CU	E2F		E2Dr	E2F		E2Dr	E2F		E2Dr	E2F		E2Dr
	7,2		9,1	34		6,0	3,9		nd	34		2,6
d₁₀ (mm)	E2F		E2Dr	E2F		E2Dr	E2F		E2Dr	E2F		E2Dr
	0,14		0,12	0,06		0,17	0,42		nd	0,06		0,36
Teneur en fines (%)	E2F		E2Dr	E2F		E2Dr	E2F		E2Dr	E2F		E2Dr
	0,59		0,46	0,39		0,14	0,25		nd	0,21		0,12

E1 : premier étage ; E2 : second étage ; E1F : horizon filtrant du premier étage ; E2F : horizon filtrant du second étage ; E2Dr : horizon de drainage du second étage ; EH : équivalent-habitant ; CU : coefficient d'uniformité ; d10 : 10 % des grains de la matrice ont un diamètre (en mm) inférieur à la valeur du d10.

Tableau I. Caractérisation des stations étudiées

	A	B	C	D	MOLLE <i>et al.</i> , 2004
MES (g/m ² /j)	52	49	37	79	50
DCO (g/m ² /j)	117	89	83	105	100
DBO ₅ (g/m ² /j)	45	42	32	53	50
NTK (g/m ² /j)	11	11	8	13	10
NH4 (g/m ² /j)	8	7	6	9	-
Ptot (g/m ² /j)	3	2	2	3	-

MES : matières en suspension ; DCO : demande chimique en oxygène ; DBO₅ : demande biochimique en oxygène ; NTK : azote total Kjeldahl ; Ptot : phosphore total.
Tableau II. Charges de dimensionnement des stations. Les charges correspondent aux charges d'entrée dans la station

car elles sont les plus âgées en service sur le bassin (> 10 ans) recensées par l'agence de l'eau Rhin-Meuse [AERM, 2013]. Elles sont situées sur les communes d'Erckartwiller (14 ans de fonctionnement, notée A par la suite), Deuxville (14 ans de fonctionnement, notée B par la suite), Nixéville-Blercourt (15 ans de fonctionnement, notée C par la suite) et Saint-Julien-sous-les-Côtes (11 ans de fonctionnement, notée D par la suite). Les caractéristiques de ces stations sont données *tableaux I et II*. Toutes ces stations comprennent deux étages de filtration, fonctionnent de manière alternée et intermittente [MOLLE *et al.*, 2004] et ont été plantées de roseaux communs *Phragmites australis* lors de leur mise en œuvre. Les prélèvements ont été réalisés le 28 mai 2013 (A), le 29 mai 2013 (B), le 30 mai 2013 (C) et le 3 juin 2013 (D). Lors de l'étude, les filtres du premier étage de la station D présentaient un phénomène de colmatage total.

1.2. Stratégie de prélèvement

Sur chaque station, les prélèvements et les mesures *in situ* ont été réalisés sur le filtre qui était en phase de repos. Les conventions suivantes ont été adoptées pour la dénomination des échantillons (*figure 1*) :

- selon l'étage : les échantillons réalisés sur le premier étage sont notés E1, ceux réalisés sur le second étage sont notés E2 ;
- selon le point de prélèvement : pour le premier étage, deux types de prélèvement ont été réalisés afin de prendre en compte l'hétérogénéité spatiale du système. Les échantillons situés à 1 m et 2 m de l'alimentation en effluent sont notés respectivement P1 et P2. Pour le second étage, la répartition des rampes d'alimentation homogénéisant l'effluent en surface du filtre a permis de définir un seul point de prélèvement équidistant des rampes pour toutes les stations étudiées ;
- selon l'horizon de prélèvement : les horizons de prélèvement sont référencés comme de « dépôt » D (horizon superficiel composé uniquement de matière accumulée), de « filtration » F (horizon situé immédiatement sous l'horizon précédent et composé d'un mélange de granulats et de matière accumulée) et enfin de « drainage » Dr (uniquement pour le second étage, correspond à l'horizon situé en dessous de l'horizon de filtration).

Ces notations sont récapitulées dans le *tableau III*.

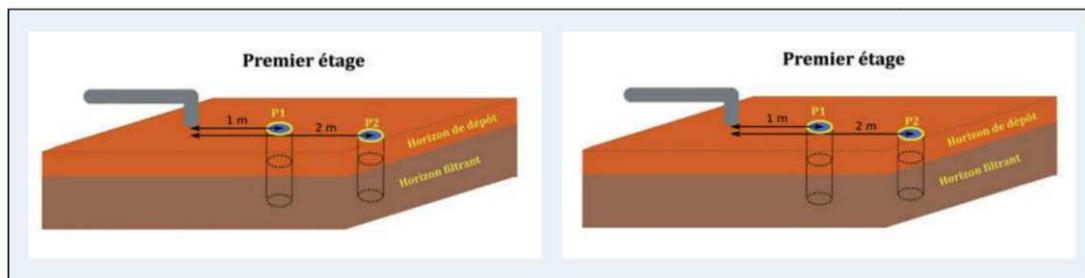


Figure 1. Localisation des points de prélèvement. Quatre échantillons ont été définis sur le premier étage et trois sur le second

	Horizon de dépôt	Horizon filtrant	Horizon de drainage
1 ^{er} étage	E1P1D, E1P2D	E1P1F, E1P2F	–
2 ^e étage	E2D	E2F	E2Dr

Tableau III. Nomenclature des échantillons

1.3. Vitesse d'infiltration

1.3.1. Mesure *in situ*

L'infiltration cumulée est mesurée à l'aide d'un infiltromètre à double-anneau (figure 2), l'incertitude associée à cette mesure sur le terrain étant de l'ordre de 20 % [BOIVIN, 1990]. La mesure est réalisée en plusieurs étapes selon la norme NF X 30-418 de la façon suivante :

- préparation de l'aire d'essai qui consiste principalement à la coupe au sécateur des végétaux au ras de la surface du filtre de manière à faciliter l'implantation des anneaux sans déstructurer le milieu poreux et le système racinaire en place ;
- mise en place des anneaux concentriques dont l'enfoncement de quelques centimètres dépendra de la résistance du milieu ;
- mise en eau des deux compartiments de l'infiltromètre à la même hauteur d'eau afin que celle-ci s'infilte à la même vitesse autour et dans l'anneau de mesure. L'écoulement dans l'anneau extérieur va favoriser l'infiltration verticale de l'eau contenue dans l'anneau intérieur en la canalisant. Le flux d'infiltration est alors quantifié par la mesure de la diminution de la hauteur d'eau dans l'anneau interne – lecture de l'échelle apposée sur la face interne (figure 2) et chronométrage simultané. On obtient ainsi une courbe donnant l'infiltration d'eau cumulée en fonction du temps ; la vitesse d'infiltration du filtre est ensuite déduite de la partie linéaire de cette courbe. Pour chaque point, deux mesures sont effectuées :



Figure 2. Perméamètre à double-anneau en fonction

- la première réalisée sur le granulat colonisé sans déstructuration du massif (la partie aérienne des plantes ayant été au préalable taillée délicatement à l'aide d'un sécateur). La vitesse d'infiltration mesurée correspond alors à l'hydrodynamique du filtre après 10 ans de fonctionnement ;
- la seconde réalisée au même endroit que la première, mais après curage de la couche de dépôt, correspond à la vitesse d'infiltration du filtre après simple curage du dépôt.

1.3.2. Mesure en laboratoire

500 mL d'échantillons sont placés dans une éprouvette perforée à la base et dont les perforations sont protégées par une géogrille. Le dispositif et la méthode pour le calcul des vitesses d'infiltration sont ceux d'un test de Grant [COOPER *et al.*, 1996]. Trois mesures successives sont effectuées pour chaque échantillon.

1.4. Caractérisation physico-chimique des granulats

1.4.1. Stratification verticale

La densité racinaire sur les différents étages a été évaluée par des critères qualitatifs sur la base des observations de terrain : elle est évaluée comme faible ou forte.

La stratification verticale du filtre a été déterminée consécutivement aux mesures de vitesse d'infiltration en mesurant l'épaisseur des horizons rencontrés. Dans le cas de la station D, le phénomène de colmatage total constaté a entraîné au cours du fonctionnement la formation d'une couche d'effluent densifié non minéralisé, non représentatif d'une accumulation/minéralisation progressive des boues.

Les données de charge d'entrée utilisées pour le dimensionnement (tableau II) sont ramenées à l'unité de surface de filtre pour s'affranchir des différences de surface entre stations ; elles sont donc exprimées en $g/m^2/j$. Les données de charge d'entrée en fonctionnement ont été obtenues sur le système d'information en ligne mis en place par l'agence de l'eau Rhin-Meuse [AERM, 2013] et ont également été exprimées en $g/m^2/j$; elles regroupent les données

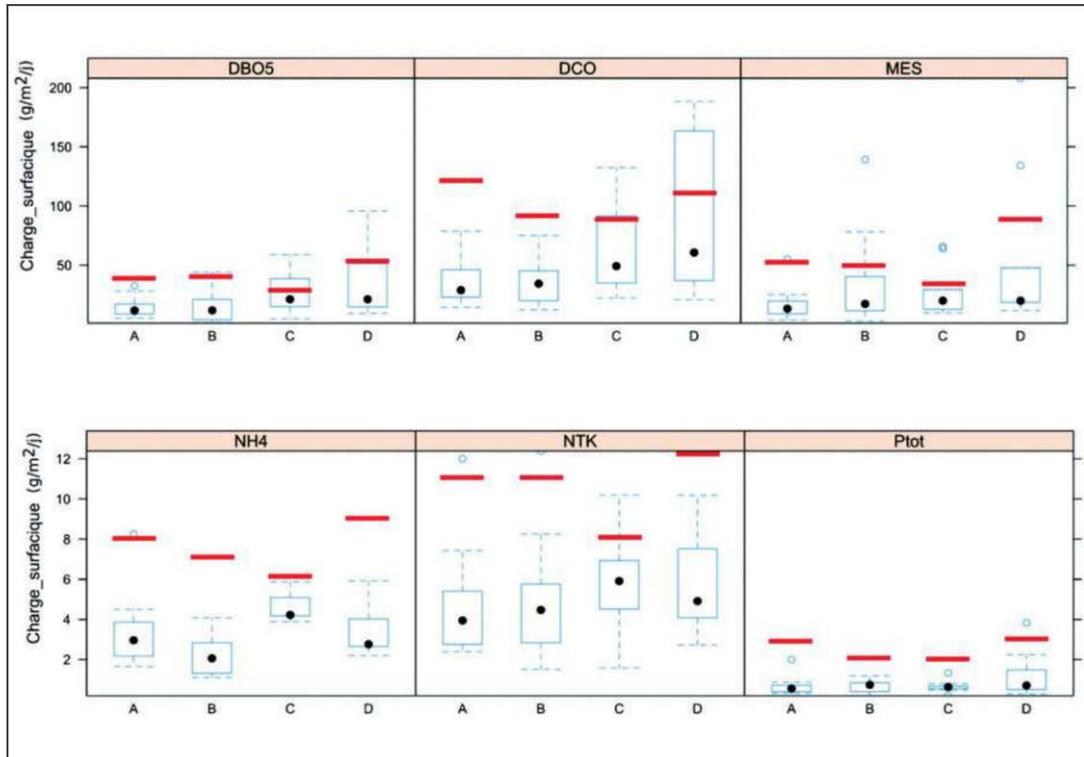


Figure 3. Comparaison entre les charges surfaciques relevées sur le terrain (boîtes à moustaches) et les charges surfaciques utilisées pour le dimensionnement (trait rouge horizontal)

mesurées à l'entrée de chaque station entre 2004 et 2011, à raison d'environ une mesure par an. Elles sont représentées sous forme de boîtes à moustache, ce qui permet de rendre compte de leur variabilité (figure 3). Ces représentations ont été réalisées à l'aide du logiciel R [R CORE TEAM, 2013].

1.4.2. Teneur en matière organique

L'échantillon est séché à 105 °C dans une coupelle jusqu'à obtention d'une masse constante. Trois réplicats sont ensuite pesés (M_0) puis placés à 450 °C pendant 3 heures pour réaliser la combustion des matières volatiles (MV) assimilées à la matière organique. La pesée des réplicats après combustion (M_1) permet de déterminer la quantité de MV par différence. On en déduit finalement la teneur en matières organiques selon la formule suivante :

$$\text{Teneur en matières organiques} = \frac{MV}{M_0} = \frac{M_1 - M_0}{M_0}$$

1.4.3. Porosité et granulométrie

Afin de caractériser le granulat mis en œuvre à la construction d'un point de vue structural, porosité et granulométrie des granulats prélevés sur le terrain ont été mesurées. Pour la porosité, une éprouvette de 1 L de masse connue est pesée après ajout de 200 mL (V_{apparent}) d'échantillon séché à 105 °C dans une étuve. Un volume de 200 mL d'eau est alors ajouté, ce qui donne le volume $V_{\text{initial éch+eau}}$; le volume de l'ensemble est mesuré une fois celui-ci stabilisé, ce qui donne le volume $V_{\text{final éch+eau}}$. La porosité du granulat prélevé sur le terrain est alors déterminée par différence :

$$\text{Porosité} = \frac{V_{\text{initial éch+eau}} - V_{\text{final éch+eau}}}{V_{\text{apparent échantillon}}}$$

La détermination de la distribution de la taille des granulats constituant les échantillons lavés est réalisée par un granulomètre mécanique selon la norme NF EN 933-1. Les valeurs de ces paramètres figurent dans le *tableau I*.

1.5. Récapitulatif

Les analyses réalisées et les échantillons analysés sont récapitulés dans le *tableau IV*.

2. Résultats et discussion

2.1. Hydrodynamique des filtres

2.1.1. Impact d'un curage simulé sur la vitesse d'infiltration (terrain)

Sur le premier étage, on observe tout d'abord des différences de vitesses d'infiltration variables en

fonction des sites (*figure 4*) : sur la station A, $V_{inf} = 0,0060 \pm 0,0010$ mm/s ; sur la station B, $V_{inf} = 0,75 \pm 0,15$ mm/s ; sur la station C, $V_{inf} = 0,034 \pm 0,015$ mm/s ; sur la station D, $V_{inf} = 0,0085 \pm 0,0065$ mm/s. Pour les stations A, C et D, ces vitesses sont d'un ordre de grandeur comparable à la conductivité hydraulique à saturation mesurée sur un filtre vertical âgé de 9 ans (0,0042 mm/s) par MORVANNOU et coll. [2013]. La vitesse d'infiltration bien plus élevée obtenue pour la station B peut s'expliquer par l'accumulation de boues plus faible constatée sur cette station.

	Mesure		Horizon		
	Sur le terrain	En laboratoire	Dépôt	Filtration	Drainage
Vitesse d'infiltration (I)	✓		✓	✓	
Vitesse d'infiltration (II)		✓		✓ (lavé)	✓ (lavé)
Stratification verticale	✓		✓	✓	✓
Teneur en matières organiques		✓	✓	✓	✓
Porosité		✓		✓	✓
Granulométrie		✓		✓	✓

Tableau IV. Récapitulatif des analyses. Le protocole de chaque analyse est détaillé dans la partie « matériel et méthodes »

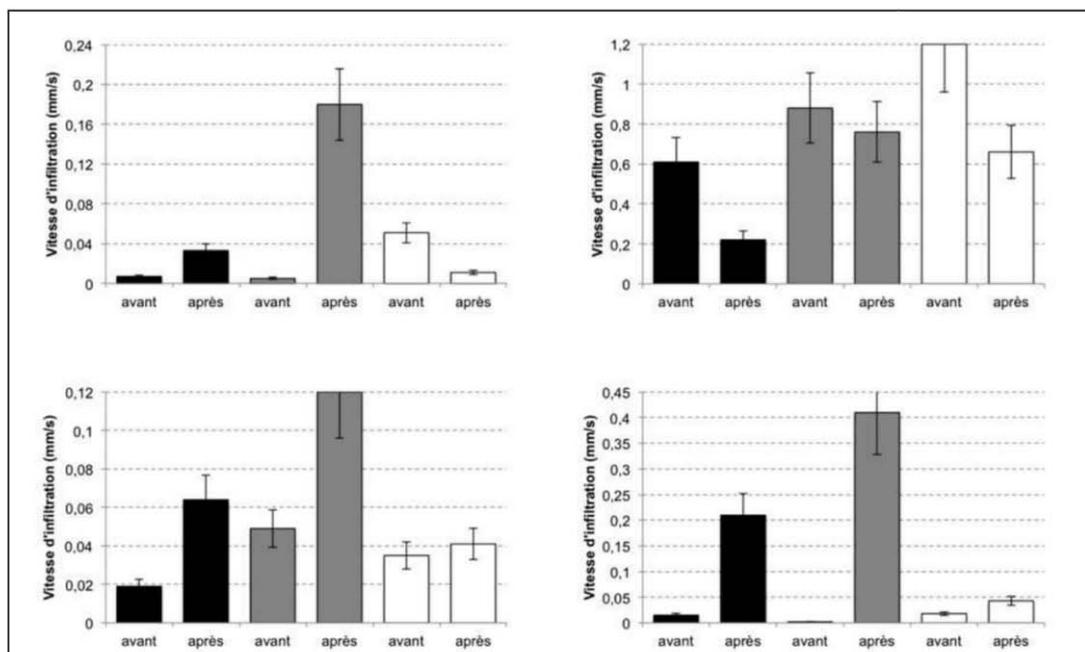


Figure 4. Évolution des vitesses d'infiltration sur le terrain. De gauche à droite et de haut en bas : A, B, C, D. Noir : E1P1 ; gris : E1P2 ; blanc : E2. Les barres d'erreur représentent la variabilité associée aux mesures d'infiltration par infiltromètre double-anneau sur le terrain. La notation « avant » correspond à la vitesse d'infiltration du filtre après 10 ans de fonctionnement. La notation « après » correspond à la vitesse d'infiltration du filtre après curage des boues

Sur le second étage, on observe des vitesses d'infiltration plus élevées que sur le premier étage, probablement en raison de l'accumulation moins forte de boues. Ainsi on relève : sur la station A, $V_{\text{inf}} = 0,05 \text{ mm/s}$; sur la station B, $V_{\text{inf}} = 1,2 \text{ mm/s}$; sur la station C, $V_{\text{inf}} = 0,035 \text{ mm/s}$; sur la station D, $V_{\text{inf}} = 0,018 \text{ mm/s}$. Cette tendance est inverse à celle recherchée initialement, c'est-à-dire un temps d'infiltration plus élevé (et donc une vitesse d'infiltration plus faible) sur le second étage que sur le premier. Ces valeurs sont inférieures à celle de conductivité hydraulique à saturation ($1,5 \text{ mm/s}$) trouvée par MORVANNOU et coll. [2013] sur cet étage, sauf pour la station B dont l'accumulation est moins élevée (cf. paragraphe précédent). Cela peut s'expliquer par le fait que les filtres étudiés sont plus âgés, entre 11 et 15 ans, contre 9 ans pour le filtre étudié dans ces travaux.

Le colmatage est donc plus important sur le premier étage, ce qui entraîne une vitesse d'infiltration plus faible que sur le second étage en dépit de la granulométrie plus grossière et de la vitesse d'infiltration initiale plus élevée sur le premier étage.

Lorsque l'on procède au curage de la boue, on observe sur le premier étage un effet similaire sur les deux points de mesure (figure 4) : amélioration significative pour les stations A ($V_{\text{curé}}/V_{\text{init}} = 4,7$ pour P1 et $V_{\text{curé}}/V_{\text{init}} = 36$ pour P2), C ($V_{\text{curé}}/V_{\text{init}} = 3,4$ pour P1 et $V_{\text{curé}}/V_{\text{init}} = 2,4$ pour P2) et D ($V_{\text{curé}}/V_{\text{init}} = 14$ pour P1 et $V_{\text{curé}}/V_{\text{init}} = 205$ pour P2) et évolution non significative (due à la variabilité associée aux mesures par infiltromètre double-anneau, rapportée par BOIVIN [1990]) pour la station B. On remarque que l'amélioration la plus forte est logiquement constatée sur la station D, qui présentait un colmatage total lors de l'étude. Sur le second étage, l'effet est moins marqué : amélioration pour les stations C ($V_{\text{curé}}/V_{\text{init}} = 1,2$) et D ($V_{\text{curé}}/V_{\text{init}} = 8,3$), diminution pour les stations A ($V_{\text{curé}}/V_{\text{init}} = 0,55$) et B ($V_{\text{curé}}/V_{\text{init}} = 0,21$). Cette atténuation de l'effet du curage est à relier à l'accumulation de matière plus faible sur le second étage que sur le premier, et à une modification consécutivement plus faible de la perméabilité de l'ensemble. On remarque également que le curage a pour effet de rétablir une vitesse

d'infiltration plus élevée sur le premier étage que sur le second.

Ces modifications de vitesse d'infiltration à la suite de la présence de solides accumulés ont déjà été reportées dans la littérature pour des filtres contenant des granulats de taille similaire à celle des filtres étudiés, dans le sens d'une amélioration ou d'une dégradation ; ainsi l'étude de KNOWLES et DAVIES [2009] a relevé une diminution de la conductivité hydraulique concomitante à une accumulation de solides alors que CHAZARENC et MERLIN [2005] ont observé une amélioration de la percolation d'un facteur 5. Les résultats de la présente étude tendent, eux, à montrer que l'opération de curage semble diminuer de manière significative le colmatage superficiel lié au dépôt de surface et en conséquence améliore les capacités d'infiltration des filtres du premier étage des FPR. Du point de vue opérationnel, cela permettrait ainsi d'envisager une dissociation du curage de l'horizon de dépôt et du remplacement du granulat, pour permettre de restaurer la capacité hydraulique du filtre.

2.1.2. Vitesse d'infiltration du granulat lavé (laboratoire)

Les vitesses d'infiltration des granulats lavés sont bien plus élevées en moyenne que celles des granulats curés sur le terrain (figure 5). Cela provient probablement du protocole expérimental différent qui a été employé, mais également du fait que le curage sans remplacement de l'horizon profond simulé sur le terrain ne joue pas sur le colmatage lié à la croissance de la biomasse sur le support granulaire. On constate également que la vitesse d'infiltration du granulat du

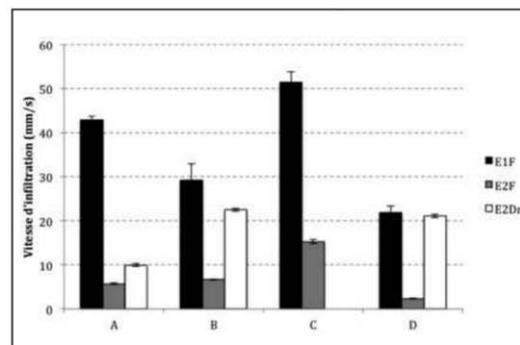


Figure 5. Vitesses d'infiltration du substrat lavé (tests en laboratoire)

14 & 15 octobre 2015
TROYES - Aube
Parc des Expos



www.assises-anc.com



Informations : s.noel@idealconnaissances.com

Une manifestation



Co-organisée avec



Sous le haut patronage de



Partenariat presse



premier étage est significativement plus importante que celle du granulat du second étage, ce qui est cohérent avec les tailles des granulats mis en œuvre (gravier pour le premier étage, sable pour le second) et à relier aux fonctions prévues pour ces deux étages (filtration des matières en suspension MES pour le premier, lente filtration pour permettre la nitrification pour le second).

2.1.3. Comparaison curage superficiel/remplacement du granulat

Au-delà de la nécessaire évacuation de la boue accumulée, le curage superficiel permet donc une amélioration significative de la vitesse d'infiltration dans les filtres, qui n'est toutefois pas équivalente à l'amélioration obtenue par le remplacement total du granulat de la couche filtrante. Ainsi, le *tableau V* quantifie les évolutions obtenues : dans 13 cas sur 16, le curage ou le remplacement du granulat améliorent la vitesse d'infiltration. Le curage permet un gain de l'ordre d'un facteur 10, le remplacement permettant lui un gain de l'ordre d'un facteur 100.

2.2. Caractérisation du dépôt

2.2.1. Stratification verticale

De façon globale, la densité racinaire est plus importante sur le premier étage du filtre que sur le second (*figures 6 et 7*), probablement en raison de la plus grande quantité de substrat disponible sur le premier étage. On constate une densité racinaire nettement plus importante sur le premier étage des stations A, C et D que sur celui de la station B. Ces différences de densité racinaire constatées au niveau du premier étage entre stations peuvent provenir de la prédominance des espèces végétales : les roseaux prédominaient sur les stations A (*figure 8*), C et D tandis que



Figure 6. Coupe de l'horizon de dépôt sur le 1^{er} étage du filtre (site A)



Figure 7. Coupe de l'horizon de dépôt sur le 2^e étage du filtre (site A)

les orties prédominaient sur la station B (*figure 9*). Après discussion avec les exploitants des sites étudiés, il apparaît que cette répartition dépend fortement des pratiques d'exploitation, notamment de l'entretien des plantations au sein des filtres, surtout pendant les premiers mois d'exploitation.

V_{inf}/V_{inf_10}	E1		E2	
	Curé	Lavé	Curé	Lavé
A	18,0	397,4	0,2	518,4
B	0,7	59,2	0,5	10,1
C	2,6	673,3	1,2	372,4
D	36,6	70,3	2,4	55,1

Tableau V. Rapport des vitesses d'infiltration après maintenance sur la vitesse d'infiltration (V_{inf}) après 10 ans de fonctionnement. E1 : premier étage du filtre ; E2 : second étage du filtre



Figure 8. Premier étage de filtres plantés de roseaux (site A)



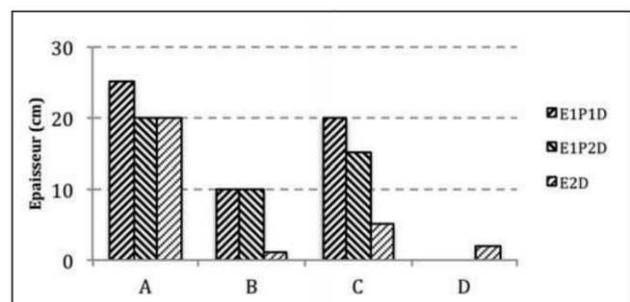
Figure 9. Premier étage de filtres plantés de roseaux (site B)

Avant d'analyser l'accumulation de matière observée sur les stations, il convient de vérifier les paramètres de dimensionnement des filtres. Tout d'abord, la surface de premier étage par équivalent-habitant (EH) est égale à 1,34 m²/EH (A), 1,35 m²/EH (B), 1,88 m²/EH (C) et 1,27 m²/EH (D). La règle de dimensionnement en France préconise une surface comprise entre 1,2 et 1,3 m²/EH [BOUTIN *et al.*, 1997]. Seule la station C présente un surdimensionnement de l'ordre de 45 %. Les trois autres stations étudiées sont donc correctement dimensionnées. En ce qui concerne l'adéquation des charges de fonctionnement réelles avec les charges de fonctionnement utilisées pour le dimensionnement, les charges réelles sont quasiment toutes inférieures aux charges nominales, voire similaires dans le cas de la demande chimique en oxygène (DCO) pour la station D (figure 3). Les stations étudiées fonctionnent donc à une capacité inférieure à la charge nominale.

Les épaisseurs des différents horizons sont présentées dans la figure 10. On observe une accumulation de boues variable entre les stations étudiées, aussi bien

au niveau du premier que du second étage. L'accumulation la plus élevée est observée sur la station A (22,5 cm) et la moins élevée sur la station B (10 cm). On observe également une hétérogénéité d'accumulation au sein du premier étage pour les stations A et C, malgré la présence de plaques de béton au droit des points d'alimentation destinées à limiter l'affouillement et à favoriser la distribution de l'effluent [KNOWLES *et al.*, 2011] en surface des filtres. Sur le premier étage, l'horizon de dépôt atteint en moyenne 22,5 cm pour la station A, 10 cm pour la station B et 17,5 cm pour la station C. Pour le second étage, on observe une forte accumulation de boues (20 cm) sur la station A, alors que l'on observe une accumulation beaucoup plus faible, comprise entre 1 et 5 cm et inférieure à celle des premiers étages respectifs, pour les autres stations. Cela semble cohérent, la charge des effluents diminuant après le premier étage de traitement (86 % d'abattement en MES, 79 % en DCO d'après MOLLE et coll. [2004]). Pour toutes les stations, l'épaisseur de la couche de filtration (F) était supérieure à 50 cm sur les deux étages de filtre.

Les valeurs obtenues peuvent être comparées aux valeurs données dans l'étude de MOLLE et coll. [2004]. Les auteurs y indiquent un taux d'accumulation de 1,5 cm de boues par an sur un filtre de premier étage, pour une charge de fonctionnement analogue à celles des stations étudiées (tableau II). Les valeurs relevées sont similaires pour la station A avec 22,5 cm relevés (soit 1,6 cm/an) contre 21 cm potentiels et, pour la station C, avec 17,5 cm relevés (soit 1,2 cm/an) contre 22,5 cm potentiels, mais



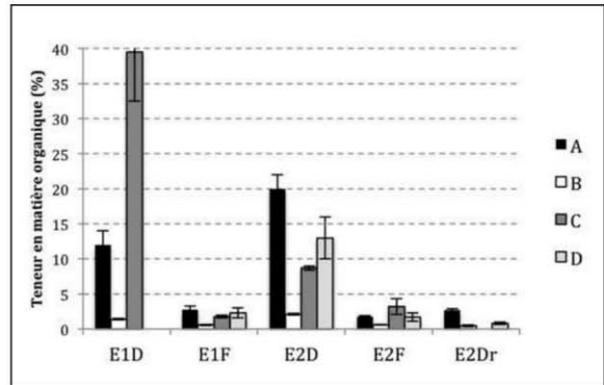
E1P1D : horizon de dépôt du premier étage, premier point de prélèvement ; E1P2D : horizon de dépôt du premier étage, second point de prélèvement ; E2D : horizon de dépôt du second étage.

Figure 10. Épaisseur des horizons. L'absence de barre indique une absence de valeur

peuvent également différer fortement dans le cas de B avec 10 cm relevés (soit 0,7 cm/an) pour 21 cm potentiels. La différence relevée dans le cas de la station B pourrait s'expliquer par la présence importante d'eaux claires parasites sur le site. Celles-ci, estimées à 222 % des eaux usées, entraînent une surcharge hydraulique et le déversement fréquent d'effluent par le by-pass. Enfin, ce calcul ne peut pas s'appliquer à la station D en raison du récent remplacement du support granulaire dont elle a fait l'objet.

2.2.2. Teneur en matière organique

La teneur en matière organique est peu variable entre les points E1P1D et E1P2D d'une part, et entre les points E1P1M et E1P2M d'autre part ; les valeurs moyennes de chaque horizon sur le premier étage sont donc présentées. On observe de manière globale (figure 11) que les horizons échantillonnés présentent une faible teneur en matière organique, comprise entre 0,45 % et 20 %, excepté pour l'horizon de dépôt de la station C (40 %). Ces valeurs sont cohérentes avec celles données par des études précédentes faisant état d'une teneur en matière organique comprise entre 3 et 20 % [CASELLES-OSORIO *et al.*, 2007 ; KNOWLES *et al.*, 2011] pour ce type d'échantillon. Cette faible teneur en matière organique sur les FPR provient de la minéralisation de la matière organique au sein de ces filières de traitement. La forte teneur en matière organique, observée pour la station C, pourrait provenir de la présence sur cette station d'un ouvrage de dessablage en tête (contrairement aux autres stations de l'étude), ce qui réduit la part de matière minérale entrant dans la station et augmente ainsi relativement la part organique de l'effluent entrant. En résumé, en calculant la moyenne des valeurs obtenues sur les quatre stations, on obtient les résultats suivants : sur le premier étage de ce type de filière, la teneur en matière organique de l'horizon de dépôt est d'environ 18 % ($17,6 \pm 9,8$ %), celle de l'horizon de filtration est d'environ 2 % ($1,9 \pm 0,5$ %). Le dépôt d'eau usée se faisant sur l'horizon superficiel, il est normal que ce dernier soit le plus riche en matière organique. Sur le second étage, la teneur en matière organique de l'horizon de dépôt est d'environ 11 % ($10,9 \pm 3,8$ %), celle de l'horizon de filtration est d'environ 2 % ($1,8 \pm 0,5$ %) et celle de



E1D : horizon de dépôt du premier étage ; E1F : horizon de filtration du premier étage ; E2D : horizon de dépôt du second étage ; E2F : horizon de filtration du second étage ; E2Dr : horizon de drainage du second étage.

Figure 11. Teneur en matière organique des échantillons de terrain

l'horizon de drainage est d'environ 1,3 % ($1,3 \pm 0,6$ %). Là encore l'horizon sur lequel se fait le dépôt est le plus riche en matière organique. La décroissance de teneur en matière organique entre les horizons superficiels et les horizons filtrants/de drainage ainsi calculée est confirmée par les observations visuelles de terrain.

2.3. Effet des différents paramètres externes

On a vu que les charges de dimensionnement utilisées sont proches des valeurs de fonctionnement pour toutes les stations et que la surface allouée par EH n'explique pas les variations obtenues. Il est donc plus probable que les différences observées au niveau de l'accumulation de boues, du colmatage des filtres ou des plantes présentes proviennent de différences d'exploitation ou d'incidents de fonctionnement/exploitation au cours de la vie de la station. Cela est notamment le cas pour la station D pour laquelle la granulométrie est faible comparée aux recommandations, ce qui a entraîné le phénomène de colmatage. Ou encore pour la station B, où une surcharge hydraulique avérée entraîne un déversement anormalement fréquent de l'effluent par le by-pass.

Enfin, l'état des différents FPR au moment de l'étude dépend notamment fortement de la maintenance réalisée sur ces stations et des conditions météorologiques récentes. L'évaluation précise de la situation nécessiterait donc un suivi plus régulier sur le long terme.

Conclusion

Quatre stations de traitement des eaux usées de type FPRv fonctionnant selon un mode opératoire français ont été étudiées afin d'évaluer le vieillissement de ce type d'ouvrages après plus de 10 années de fonctionnement. Les charges surfaciques entrantes relevées en fonctionnement [AERM, 2013] montrent que ces stations fonctionnent à un niveau de charge cohérent avec celui utilisé pour le dimensionnement, ce qui laisserait supposer *a priori* d'une évolution classique pour ces stations.

L'accumulation constatée sur les stations étudiées confirme dans certains cas (sites A et C) le taux d'accumulation de 1,5 cm/an relevé par MOLLE et coll. [2004]. De même, la teneur en matière organique du granulat accumulé en surface des filtres varie entre 0,45 % et 20 %, en raison de la minéralisation de la matière organique et de la rémanence de la matière minérale au cours du fonctionnement de la station. La présence d'un ouvrage de traitement primaire de

type dessableur fait cependant varier cette teneur de manière significative pour atteindre 40 % (station C). Les tests de curage effectués sur le terrain ont mis en évidence une amélioration significative de la vitesse d'infiltration, sans toutefois parvenir à retrouver la vitesse d'infiltration initiale évaluée lors de tests en laboratoire. Dans le cadre d'un entretien courant, il peut donc être suffisant de retirer la couche superficielle sans toucher au granulat pour retrouver une vitesse d'infiltration compatible avec un bon fonctionnement hydraulique du filtre. Les différences de colmatage observées entre les différents sites d'étude semblent être principalement liées à des différences de maintenance ou d'exploitation.

Remerciements

Les auteurs remercient Marie-Pierre Ottermatte pour son aide, les exploitants des stations étudiées pour leur collaboration et l'agence de l'eau Rhin-Meuse pour le financement de cette étude.

Bibliographie

- AERM (2013) : « Service d'Information sur l'Eau Rhin-Meuse ». <http://rhin-meuse.eaufrance.fr>, 2013, consultation le 20 février 2014.
- BOIVIN P. (1990) : « Caractérisation de l'infiltrabilité d'un sol par la méthode Muntz : variabilité de la mesure ». *Bulletin - Réseau Erosion* ; 10 : 14-24.
- BOUTIN C., LIENARD A. et ESSER D. (1997) : « Development of a new generation of reed-bed filters in France: First results ». *Water Science and Technology* ; 35(5) : 315-322.
- CASELLES-OSORIO A., PUIGAGUT J., SEGU E., VAELO N., GRANES F., GARCIA D., GARCIA J. (2007) : « Solids accumulation in six full-scale subsurface flow constructed wetlands ». *Water Research* ; 41 : 1388-1398.
- CHAZARENCO F., MERLIN G. (2005) : « Influence of surface layer on hydrology and biology of gravel bed vertical flow constructed wetlands ». *Water Science and Technology* ; 51(9) : 91-97.
- COOPER P.F., JOB G.D., GREEN M.B., SHUTES R.B.E. (1996) : *Reed beds and constructed wetlands for wastewater treatment*. WRc plc, Swindon, 1996, 184 p.
- KADLEC R. H., WALLACE S. (2009) : *Treatment wetlands*, 2nd edition. Londres, New York : CRC Press, 1016 p.
- KNOWLES P., DAVIES P.A. (2009) : « A method for the in-situ determination of the hydraulic conductivity of gravels as used in constructed wetlands for wastewater treatment ». *Desalination and Water Treatment* ; 5 : 257-266.
- KNOWLES P., DOTRO G., NIVALA J., GARCIA J. (2011) : « Clogging in subsurface-flow treatment wetlands : Occurrence and contributing factors ». *Ecological Engineering* ; 37 : 99-112.
- MOLLE P., LIENARD A., BOUTIN C., MERLIN G., IWEMA A. (2004) : « Traitement des eaux usées domestiques par marais artificiels : état de l'art et performances des filtres plantés de roseaux en France ». *Ingénieries* ; n° spécial : 23-32.
- MORVANNOU A., FORQUET N., VANCLOOSTER M., MOLLE P. (2013) : « Characterizing hydraulic properties of filter material of a vertical flow constructed wetland ». *Ecological Engineering* ; 60 : 325-335.
- PEDESCOLL A., UGGETTI E., LLORENS E., GRANES F., GARCIA D., GARCIA J. (2009) : « Practical method based on saturated hydraulic conductivity used to assess clogging in subsurface flow constructed wetlands ». *Ecological Engineering* ; 35 : 1216-1224.
- PLATZER C., MAUCH K. : (1997) « Soil clogging in vertical flow reed beds - mechanisms, parameters, consequences and ... solutions? » *Water Science and Technology* ; 35(5) : 175-181.
- R CORE TEAM (2013) : *R: A Language and Environment for Statistical Computing*.
- VYMAZAL J. (2002) : « The use of sub-surface constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic: 10 years experience ». *Ecological Engineering* ; 18 : 633-646.

Résumé

P. BOIS, J. LAURENT, M. NUEL, A. WANKO

Indicateurs de colmatage de filtres plantés de roseaux à écoulement vertical : étude comparative de quatre stations de traitement après 10 ans de fonctionnement

L'effet du vieillissement sur le colmatage de quatre stations de traitement de type filtre planté de roseaux a été étudié sur le terrain et en laboratoire. Il ressort de l'étude qu'un curage de la boue déposée permet d'améliorer la vitesse d'infiltration sur le premier étage (trois cas sur quatre) et parfois sur le second étage (deux cas sur quatre). Le renouvellement du granulat permet lui une augmentation de la vitesse d'infiltration d'un facteur 100 environ. Les taux d'accumulation de boue relevés varient entre 0,7 et 1,6 cm/an sur le premier étage

des filtres. La teneur en matière organique du dépôt varie entre 0,45 % et 20 % en fonction de la présence d'ouvrages de traitement primaire en amont de la station. Les différences de colmatage observées entre les différents sites d'étude semblent être principalement liées à des différences de maintenance ou d'exploitation. L'utilisation d'un infiltromètre double-anneau pourrait permettre de s'assurer du bon fonctionnement hydraulique du système et de planifier les opérations de curage des filtres.

Abstract

P. BOIS, J. LAURENT, M. NUEL, A. WANKO

Vertical flow reed bed filter aging indicators: comparative study of four constructed wetlands after ten years of operation

A study on the effect of ageing on 4 constructed wetlands designed for wastewater treatment is carried out on the field and in the laboratory. Sludge removal allows improving infiltration speed on the first (3 out of 4 sites) and sometimes on the second stage (2 out of 4 sites) of the station. Granular medium renewal enables a 100-fold infiltration speed increase. Sludge accumulation rate ranges between 0.7 and 1.6 cm/yr on the

first stage. Deposit organic matter content ranges between 0.45% and 20%, depending on the presence of primary treatment systems before the plant. Clogging differences that are observed seem to be mainly due to maintenance and operation. Double-ring infiltrometer could be used as a tool to monitor hydraulic functioning of the system and to help planning removal sequences on the filters.

Logiciel 3R 2014

Les nouvelles recommandations pour le dimensionnement de la réhabilitation par chemisage et tubage des réseaux d'assainissement sont disponibles.

Ce logiciel permet la vérification du dimensionnement mécanique, selon ces techniques, d'ouvrages (circulaires ou non) en tenant compte de trois états de dégradation de l'existant.

Il comprend :

- Un manuel d'utilisation ;
- Le texte de la méthode ;
- Cinq modules de dimensionnement mécanique : chemisage circulaire, tubage circulaire, chemisage non circulaire, tubage (avec coulis) non circulaire, tubage avec enroulement hélicoïdal ;
- Un module de dimensionnement hydraulique.



Ce logiciel comprend : le manuel d'utilisation, le texte de la méthode de dimensionnement, 5 modules de dimensionnement mécanique (chemisage circulaire, tubage circulaire, chemisage non circulaire, tubage (avec coulis) non circulaire, tubage (avec enroulement hélicoïdal) et 1 module de dimensionnement hydraulique.

Commandez-le sur <http://www.aste.org/production/logiciel-3r-2014/>