



HAL
open science

Comment éviter le colmatage irréversible des installations de biofiltration ?

B González Vázquez, J.M. Choubert, E Paul, J. P. Canler

► To cite this version:

B González Vázquez, J.M. Choubert, E Paul, J. P. Canler. Comment éviter le colmatage irréversible des installations de biofiltration ?. TSM. Techniques Sciences Méthodes – Génie urbain, génie rural, 2020, 11, pp.71-86. <hal-03217408v2>

HAL Id: hal-03217408

<https://hal.science/hal-03217408v2>

Submitted on 15 Sep 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons CC BY 4.0 - Attribution - International License

Comment éviter le colmatage irréversible des installations de biofiltration ?

How to prevent biofiltration systems from clogging?

■ B. GONZÁLEZ VÁZQUEZ¹, J.-M. CHOUBERT^{1*}, E. PAUL², J.-P. CANLER¹

¹ Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (Inrae) – UR Reversaal – Villeurbanne

² Toulouse Biotechnology Institute (TBI) – Université de Toulouse – CNRS – Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (Inrae) – Institut national des sciences appliquées (INSA) – Toulouse

Mots-clés :

Traitement des eaux usées
Biofiltration
Colmatage irréversible
Charge volumique appliquée
Indicateurs de colmatage
Mesures curatives

RÉSUMÉ

La biofiltration est une technologie compacte et efficace pour le traitement des effluents urbains. Certaines installations sont régulièrement touchées par un colmatage irréversible, nécessitant une opération curative pour retrouver sa capacité de traitement. Une première enquête menée en 2007 avait évalué l'ampleur du colmatage des biofiltres, et sensibilisé exploitants et concepteurs au phénomène. En 2018, une seconde enquête a réévalué l'ampleur du colmatage des biofiltres, a approfondi les causes et les moyens de détection de ce phénomène. Nous avons consulté les 128 biofiltres existants sur le territoire national ainsi que quelques installations d'autres pays européens, afin de collecter des données de construction et d'exploitation de différentes technologies (Biofor, Biostyr, Biolest, Biopur) fonctionnant dans différentes configurations. Nous avons également recueilli les informations concernant les cycles de lavage et la fréquence observée des colmatages irréversibles. Le taux de réponse a été de 33% donnant un échantillon de réponse représentatif du parc de biofiltres français. Nous avons montré que le colmatage irréversible semble en régression et touche principalement les installations en première étape de traitement (après le décanteur primaire). Le risque de colmatage irréversible est important au-delà de 5,8 kg de demande chimique en oxygène (DCO)/m³ matériau/cycle de filtration et de 2,1 kg de matières en suspension (MES)/m³ matériau/cycle. Néanmoins, il est également important pour des charges volumiques inférieures dans le cas d'effluents très organiques (ratios DCO/MES > 3,2), lié à une accumulation importante de biomasse malgré la faible charge en matières en suspension appliquée. L'étude a permis d'énoncer et de hiérarchiser des règles d'exploitation comprenant des indicateurs de dérive vers le colmatage irréversible, ainsi que des moyens de lutte préventifs et curatifs.

Keywords:

Wastewater treatment
Biofiltration
Clogging
Applied volumetric load
Clogging indicators
Curative solutions

ABSTRACT

Biofiltration is a compact and efficient technology for the treatment of urban effluents. On some facilities, clogging regularly occurs, requiring a curative operation to reach the treatment capacity. A first survey carried out in 2007 had assessed the extent of the biofilters clogging, making designers and operators aware of this phenomenon. In 2018, a second survey has evaluated the extent of biofilters clogging again, to propose causes and means to detect clogging. We contacted 128 existing biofilters in France as well as some facilities from other European countries, in order to collect data about design and operation of different technologies (Biofor, Biostyr, Biolest, Biopur) located in different configurations. We also obtained data about backwash and frequency of clogging. With an answer rate of 33%, we got a representative sample of the French facilities of biofiltration type. We have shown that the extent of clogging has decreased and it mainly affects the biofiltration located after the primary settling tank. The risk of clogging is important beyond 5.8 kg COD/m³ material/filtration cycle and 2.1 kg TSS/m³ material/cycle of volumetric loads. However, it also occurs for lower volumetric loads such as with very organic effluents (COD/TSS ratios > 3.2), linked to a significant accumulation of biomass despite a low suspended solids volumetric load. The study indicates the efficiency of operating rules, and provides indicators of occurrence of clogging, as well as preventive and curative solutions.

Introduction

Bien implantée en France et dans plusieurs autres pays, la biofiltration est un procédé à cultures fixées sur un support solide immergé. Sa compacité lui permet de se développer dans les zones à forte pression foncière

ou nécessitant une couverture des ouvrages telles que dans les grandes agglomérations. Sa modularité lui permet de fonctionner avec de fortes variations de charges polluantes, par exemple en zone littorale ou en station de ski. Selon les informations disponibles sur le portail d'information sur l'assainissement communal [MTES, 2018] complétées par des renseignements obtenus auprès des constructeurs, exploitants, maîtres

* Auteur correspondant - Courriel : jean-marc.choubert@inrae.fr

d'ouvrage et agences de l'eau, il existe actuellement 128 stations d'épuration en France équipées du procédé par biofiltration (dimensionné pour une vingtaine de millions d'équivalent-habitant), dont de très grosses agglomérations (Paris, Lyon, Marseille, Bordeaux). D'après les réalisations communiquées par les constructeurs en 2020, on estime à plus de 200 installations dans l'Union européenne et à environ 500 dans le monde.

Parmi les biofiltres à co-courant ascendant commercialisés par les constructeurs, on distingue deux types de support : minéral ou synthétique se différenciant par la masse volumique du matériau filtrant qui conditionne le fonctionnement et la structure du biofiltre. Pour les matériaux de masse volumique supérieure à celle de l'eau, le matériau repose sur un plancher et on observe une expansion du lit filtrant lors du traitement (Biofor, Biolest, Biopur). Avec un matériau de masse volumique inférieure à celle de l'eau, le matériau est retenu par un plafond et on observe une compression du lit filtrant lors du traitement (Biostyr). Lors du traitement pour ces deux types de biofiltres, la porosité du lit filtrant diminue progressivement, provoquant des pertes de charge du fait de l'accumulation des matières en suspension (MES) provenant de l'eau usée et des biomasses hétérotrophes et/ou autotrophes qui se développent. On parle d'encrassement du filtre [OUELLET, 1994]. Les températures froides de l'eau sont un facteur aggravant en raison des modifications des caractéristiques biochimiques des biomasses [BOLLER *et al.*, 1997 ; LE BIHAN et LESSARD, 2000 ; ROCHER *et al.*, 2008] et d'une quantité de biomasse plus importante pour un même flux à traiter en raison de vitesses d'assimilation plus faibles. La phase de régénération (aussi dénommée « lavages »), s'effectue de manière périodique par application de cycle d'air et d'eau à forte vitesse, soit à co-courant (Biofor, Biolest, Biopur) ou soit à contre-courant (Biostyr). Les lavages doivent évacuer l'encrassement, c'est-à-dire les MES retenues lors de filtration et la biomasse excédentaire développée lors du traitement [HUISMAN, 2004]. Ils doivent permettre le retour aux propriétés initiales du filtre. Les eaux issues des lavages sont renvoyées le plus souvent au traitement primaire amont, pouvant représenter 10 à 20% du volume d'eau à traiter. Ce surplus d'eau peut provoquer des dépassements de la vitesse ascensionnelle limite, engendrant des apports substantiels de MES sur le biofiltre et générer des problèmes de colmatage. Lors du diagnostic des raisons du colmatage, il est extrêmement important d'intégrer la notion de couplage retours file boue/décanteurs primaires/biofiltres. Les informations sur les vi-

tesses recommandées, et les rendements épuratoires généralement constatés sur le traitement primaire, sont disponibles dans le document FNDAE n° 18 [CANLER et PERRET, 1994].

Le colmatage irréversible est défini comme un encrassement résiduel qui ne peut pas être éliminé par des lavages classiques, voire même avec des lavages dits intensifs. La mise en place d'un colmatage irréversible se matérialise par une diminution au cours du temps de la durée des cycles de filtration, la présence de matériau dans la bêche eaux sales des biofiltres, la survenue de geysers pendant les lavages ou encore l'existence de vagues à la surface du massif filtrant. Dans certains cas, le matériau est entouré d'un gel translucide qui à l'échelle microscopique révèle un développement excessif de protozoaires coloniaux fixés (péritriches). De cette situation résulte la réduction de la porosité disponible dans le biofiltre, des performances épuratoires dégradées en raison d'un massif filtrant non homogène, des lavages fréquents augmentant les coûts d'exploitation [BARJENBRUCH, 2007] et provoquant des dysfonctionnements dans le traitement primaire. Afin d'éviter le colmatage irréversible, les charges appliquées sur les biofiltres doivent être maîtrisées, et la vitesse en eau doit être supérieure à une valeur minimale (entre 2 et 3 m³/(m²·h). En préventif ou en cas de suspicion de colmatage, l'exploitant peut appliquer des lavages dits « intensifs » ou « énergiques », c'est-à-dire avec des vitesses air et eau plus élevées (valeurs préconisées mentionnées au *tableau 1*) donc des lavages plus efficaces que les lavages classiques, mais avec un risque encore plus important de perte de matériau. Lorsqu'il ne réussit pas à retrouver la capacité de traitement du biofiltre, il peut appliquer en dernière solution des lavages dits à la soude, solution qui concernait la moitié des installations rencontrant des problèmes de colmatage irréversible en 2007 [URROZ, 2007]. Il est important de noter que de nombreux biofiltres sont exploités en l'absence d'indicateurs robustes de détection précoce du colmatage. De plus, les mécanismes de mise en place des processus de colmatage nécessitent d'être mieux compris pour mieux y remédier.

L'objectif de l'étude présentée ici était d'actualiser l'ampleur du colmatage irréversible des installations de biofiltration, de déterminer les conditions optimales de fonctionnement des biofiltres à risque vis-à-vis du colmatage irréversible (charges volumiques optimales à appliquer). L'étude visait également à proposer des recommandations en matière d'indicateurs de colmatage, et d'identifier les solutions préventives et curatives disponibles.

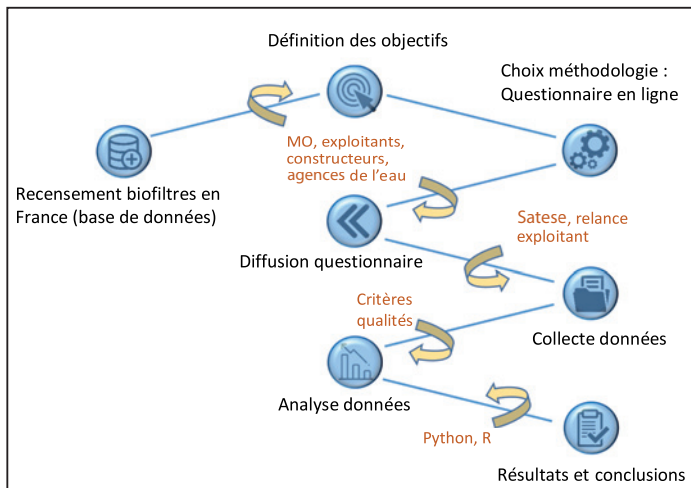
Action	Valeur seuil
Prévention du colmatage irréversible	
Vérifier le débit des pompes d'eau de lavage et les débits des compresseurs d'air de lavage	Biofor : eau 20 m/h, air 80-100 Nm/h Biostyr : eau 60-65 m/h, air 12-20 Nm/h
Vérifier le volume d'eau effectif d'un lavage	2,5 à 3 fois le volume de matériau 5 à 10% du volume traité
Vérifier le nombre effectif de lavages par jour	Nombre de lavages adapté aux charges volumiques appliquées
Vérifier la charge hydraulique minimale au cours de la phase de traitement	C et N : > 2-3 m ³ /(m ² ·h) ; DN : > 10 m ³ /(m ² ·h) Adapter le nombre de cellules de biofiltres en traitement en fonction du débit. Si besoin, implanter une recirculation des eaux traitées
Vérifier les charges volumiques en DCO et MES	Cv MES < 2,1 kg/m ³ /cycle si DCO/MES entre 2 et 3,2 ou Cv DCO < 1,1 kg/m ³ /cycle si DCO/MES > 3,2 Cv DCO < 5,8 kg/m ³ /cycle
Vérifier si le débit d'air process est suffisant	~20 Nm ³ /kg DCO ~100 Nm ³ /kg N-NH ₄ ⁺ (secondaire) ou ~125-150 (tertiaire)
Granulométrie	C : 3,5 mm ; CN et N : 2,7 mm ; DN : 4,5 mm
Vérifier la bonne utilisation des lavages intensifs (ou double lavage intensif)	Selon les indicateurs de colmatage
Détection du colmatage progressif vers un irréversible (Indicateurs de dérive)	
Réduction systématique des temps de filtration	Comparaison par rapport à une période de référence
Vérifier qu'il n'y ait pas d'augmentation du temps de vidange	Comparaison par rapport à une période de référence
Vérifier qu'il n'y ait pas d'augmentation de la perte de charge de début de cycle de filtration ou de période de rinçage (dernière phase de lavage)	Comparaison par rapport à une période de référence (ex. filtre propre pour une température similaire et au même débit)
Vérifier l'absence de geysers pendant la phase de détassage des lavages	La formation de geysers atteste la présence de chemins préférentiels au sein du lit filtrant
Vérifier l'absence de vagues à la surface du lit filtrant (Biofor ou Biolest)	La présence de vagues à la surface du lit filtrant atteste la présence de chemins préférentiels au sein du lit filtrant
Vérifier l'absence de matériau dans la bêche eau sale	La présence de matériau dans la bêche eau sale atteste de très forte vitesse localement
Mesures curatives	
Lavage chimique (soude)	Isoler la cellule colmatée. Trempage 24 heures minimum avec une solution de NaOH (1,8 L/m ³ de matériau pour un Biofor) pour atteindre pH > 10. Agiter par injection d'air jusqu'à stabilisation du pH
Arrêt biofiltres (anaérobiose)	Isoler la cellule colmatée pendant 1 mois, sans aération

C : carbone; CN : carbone et nitrification simultanés; Cv : charge volumique; DCO : demande chimique en oxygène; DN : dénitrification; MES : matières en suspension; N : nitrification.

Tableau I. Paramètres indicateurs d'une dérive vers le colmatage irréversible, mesures préventives et curatives

1. Matériels et méthodes

La démarche développée dans ce travail, représentée figure 1, comprend deux volets : la constitution d'une base de données des biofiltres et une enquête auprès des exploitants.



MO : matières organiques ; Satese : service d'assistance technique aux exploitants de station d'épuration.

Figure 1. Schématisation de la démarche développée

1.1. Constitution d'une base de données des biofiltres

Le travail a d'abord consisté à élaborer une base de données des installations biofiltres à co-courant ascendant (Biofor, Biostyr, Cise, Biolest, Biopur) et à contre-courant descendant (biocarbonate et autres) implantées sur le territoire français. Pour cela nous avons croisé le fichier de stations d'épuration national [MTES, 2018] avec des informations fournies par les constructeurs (Degrémont, OTV, Stéreau), les exploitants, les maîtres d'ouvrage et les agences de l'eau. Pour chaque installation, nous avons réuni des informations d'implantation géographique, le type et la société d'exploitation, la capacité nominale de traitement, le type de traitement amont, la technologie de biofiltration utilisée, l'année de mise en service. Ce travail avait pour objectif de caractériser précisément le parc actuel des installations de biofiltration et de le comparer aux échantillons des réponses à l'enquête pour en déterminer sa représentativité.

1.2. Enquête auprès des exploitants

Un questionnaire a été spécifiquement élaboré dans le logiciel libre LimeSurvey et accompagné d'un texte informatif expliquant le contexte et le traitement anonyme des données. L'enquête a été diffusée en mai 2018 à 114 installations sur 128 qui composent le parc français (ont été écartées de l'étude 12 stations équipées de technologies anciennes à contre-courant

descendant ainsi que deux installations à co-courant ascendant mises en service en 2018). Les contacts ont été réalisés par l'intermédiaire des directions techniques nationales des grands groupes gérant l'exploitation des stations d'épuration, les réseaux d'exploitants publics et les maîtres d'ouvrage. Durant la période de traitement du questionnaire d'une durée de 7 mois et la limite de réponse fixée à octobre 2018, de nombreuses relances ont été réalisées, et des réseaux de diffusion redondants ont été utilisés, afin d'obtenir un maximum de réponses. Le questionnaire a également été soumis à six installations situées à l'étranger (Suisse, Espagne, Hongrie et Norvège).

Le questionnaire a été structuré en quatre grandes parties :

- une partie « filière » qualifiant le site et le type de biofiltres, les communes concernées, la capacité nominale, l'année de mise en service, les traitements en amont de la biofiltration, les travaux réalisés, l'utilisation de réactifs (type, taux d'application) ;
- une deuxième partie « dispositions constructives » qualifiant le fonctionnement des biofiltres : type de traitement, dimensions, média filtrant (nom, nature, granulométrie, volume de remplissage), charges moyennes polluantes et hydrauliques appliquées sur un an ou sur la période de forte charge pour les installations soumises à des variations de charge ;
- une troisième partie « lavage » recueillant les informations effectives d'un cycle de lavage des biofiltres : fréquence des lavages, nombre de phases, durée, vitesse en eau, vitesse en air, volume d'eau de lavage, paramètres déclencheurs des lavages, fréquence d'utilisation des lavages intensifs... ;
- une quatrième partie concernant l'occurrence du colmatage irréversible : fréquence des événements, moyens pour les détecter, mesures curatives utilisées...

1.3. Traitement des données de l'enquête

Les données recueillies lors de l'enquête ont été extraites du logiciel LimeSurvey, puis mises en forme à l'aide d'un programme codé en Python.

Les informations recueillies ont fait l'objet d'une étape de validation afin de détecter les valeurs erronées. Pour cela, nous avons par exemple comparé les charges saisies avec les charges calculées à partir des concentrations et débits. De même, nous avons comparé les charges hydrauliques saisies avec celles calculées à l'aide des vitesses en eau et des dimensions des ouvrages. Des compléments d'information et des vérifications des données ont également été réalisés au moyen de questions de contrôle posées directement à l'exploitant. Chaque réponse au questionnaire a ensuite été qualifiée par un indice permettant d'apprécier la qualité ►



Des hommes au service de vos réseaux

PARTENAIRE DES INDUSTRIELS & DES EXPLOITANTS DE RÉSEAUX



- > Recherche de fuites
- > Diagnostic de réseaux
 - > Métrologie | Débitimétrie | Modulation de pression
 - > Instrumentation | Sectorisation
- > Contrôle d'organes et de réseaux
- > Outsourcing de la performance réseaux



Ax'eau recrute

16 techniciens
partout en France.

Contactez-nous :
recrutement@ax-eau.com



- 21 agences France entière
- +15 000 Km de réseaux contrôlés/an
- +60 techniciens

Les + Ax'eau

- > Présence & intervention France entière
- > Certification ISO 9001
- > Ax'eau Connect : extranet de suivi d'intervention
- > Interventions non sous-traitées

contact@ax-eau.com / www.ax-eau.com

N° Vert 0 809 109 709





blubalance

Le traitement d'eau sans produit chimique

LA SOLUTION DE TRAITEMENT D'EAU INDUSTRIELLE SANS PRODUIT CHIMIQUE

0

Produit chimique
utilisé

-30%

Economies d'eau
chez les industriels

-82%

Réduction des
rejets à la purge

“Une révolution du traitement d'eau”



blubalance traite les réseaux d'eaux de tours de refroidissement contre le tartre, la corrosion et la biocontamination



INTEGRAL Co.
WATER SOLUTIONS

INTEGRAL Co. Water Solutions

+33 7 82 52 32 79 - www.integral.ch - contact@integralco.ch

- ▶ de la réponse obtenue, cela en vue de travailler sur les informations les plus fiables, en particulier pour les paramètres les plus difficiles à connaître (durée et description des phases d'un lavage, fréquence de lavage exacte sur une période de forte charge ou encore, pour les petites installations, les charges journalières appliquées). Ces critères de qualité ont tenu compte des non-réponses des paramètres de fonctionnement demandés, du degré de détail de la réponse, de la cohérence des réponses sur l'ensemble du questionnaire. Chaque réponse au questionnaire a fait l'objet de calculs spécifiques pour aller plus loin sur l'interprétation. Nous avons calculé la fréquence des lavages ($f = 1/t$) à partir du temps de filtration (t) déclaré par l'exploitant. Les valeurs obtenues ont été vérifiées avec le nombre total de lavages par jour déclaré pour l'ensemble des biofiltres de l'installation. Pour comprendre le lien entre charge appliquée et survenue du colmatage, nous avons évalué l'occupation de la porosité des biofiltres par la biomasse. Pour cela, nous avons estimé la production de biomasse au cours d'un cycle de traitement à partir des cinétiques de développement bactérien, moyennant les hypothèses suivantes :
 - la part biodégradable dissoute de la demande chimique en oxygène (DCO) a été estimée à l'aide de l'équation 1, par soustraction des fractions particulières (équation 2), comprises entre 20% et 25% de la DCO d'entrée,

et réfractaires (équation 3), entre 7% et 12% de la DCO, à la DCO totale d'entrée. Nous avons considéré que la DCO particulaire, constituée de molécules lentement biodégradables par rapport au temps de traitement de quelques heures dans le réacteur, n'était pas transformée dans les biofiltres et était stockée par filtration puis extraite lors du lavage. Les retours des eaux sales issues des lavages ont été négligés dans le calcul de la DCO biodégradable par manque d'informations sur ces retours de la part des installations enquêtées ;

- la production journalière de biomasse hétérotrophe (P_H) a été calculée à partir de la charge volumique journalière en DCO biodégradable appliquée sur le biofiltre et du rendement de croissance (assimilé à un rendement de croissance observé tenant compte de la mortalité, mais considérant la disponibilité des substrats non limitante) selon l'équation 4. La production de biomasse hétérotrophe en conditions aérobie a été estimée à 0,4 kg de matière volatile en suspension (MVS)/m³/j pour 1 kg de DCO dissoute biodégradable/m³/j, ce qui correspond au rendement de croissance observé $Y_{H,obs}$ (équation 5). Pour les biofiltres carbone, nous avons considéré seulement la croissance hétérotrophe. Pour les biofiltres traitant le carbone et l'azote simultanément, nous avons estimé la production des biomasses hétérotrophes (P_H) et autotrophes (P_A), cette dernière étant négligeable (entre 1% et 8% de la biomasse totale) par rapport à la biomasse hétérotrophe.

$$DCO_{SOLUBLE\ BIODEGRADABLE} = DCO_{TOTALE} - DCO_{PARTICULAIRE} - DCO_{REFRACTAIRE} \quad [Équation 1]$$

$$DCO_{PARTICULAIRE} \left[\frac{kg}{m^3 \cdot j} \right] = 1,2 \cdot MES \text{ pour les eaux d'entrée STEP} \quad [Équation 2]$$

$$DCO_{REFRACTAIRE} \left[\frac{kg}{m^3 \cdot j} \right] = \begin{cases} 0,125 \cdot DCO_{TOTALE} & \text{si primaire avec ajout de réactifs} \\ 0,071 \cdot DCO_{TOTALE} & \text{si primaire sans ajout de réactifs} \end{cases} \quad [Équation 3]$$

$$P_H \left[\frac{kg\ MVS}{m^3 \cdot j} \right] = (DCO_{SOLUBLE\ BIODEGRADABLE}) \left[\frac{kg\ DCO}{m^3 \cdot j} \right] \cdot Y_H \left[\frac{kg\ MVS}{kg\ DCO\ dégradée} \right] \quad [Équation 4]$$

$$Y_{H,obs} = \frac{Y_{H,max}}{1 + \frac{k_{d,H}}{\mu_{H,max}}} \quad [Équation 5]$$

$$P_A \left[\frac{kg\ MVS}{m^3 \cdot j} \right] = (N - NH_4 \text{ nitrifié}) \left[\frac{kg\ N - NH_4}{m^3 \cdot j} \right] \cdot Y_A \left[\frac{kg\ MVS}{kg\ N - NH_4} \right] \quad [Équation 6]$$

$$Y_{A,obs} = \frac{Y_{A,max}}{1 + \frac{k_{d,A}}{\mu_{A,max}}} \quad [Équation 7]$$

Note : Les rendements de croissance observés par les micro-organismes $Y_{H,obs}$ et $Y_{A,obs}$ ont été estimés à partir des rendements de croissance maximum $Y_{H,max} = 0,44\text{ kg MVS/kg DCO}_{dégradée}$ et $Y_{A,max} = 0,17\text{ kg MVS/kg N}_{nitrifié}$, des taux de croissance ($\mu_{H,max} = 6\text{ j}^{-1}$ et $\mu_{A,max} = 0,8\text{ j}^{-1}$ à 20 °C) et les coefficients de mortalité ($k_{d,H} = 0,62\text{ j}^{-1}$ et $k_{d,A} = 0,17\text{ j}^{-1}$ à 20 °C). Ces paramètres ont été calculés à une température de 20 °C pour les installations situées en zones littorales et grandes agglomérations, et à une température de 10 °C pour celles situées en montagne.

2. Résultats et discussion

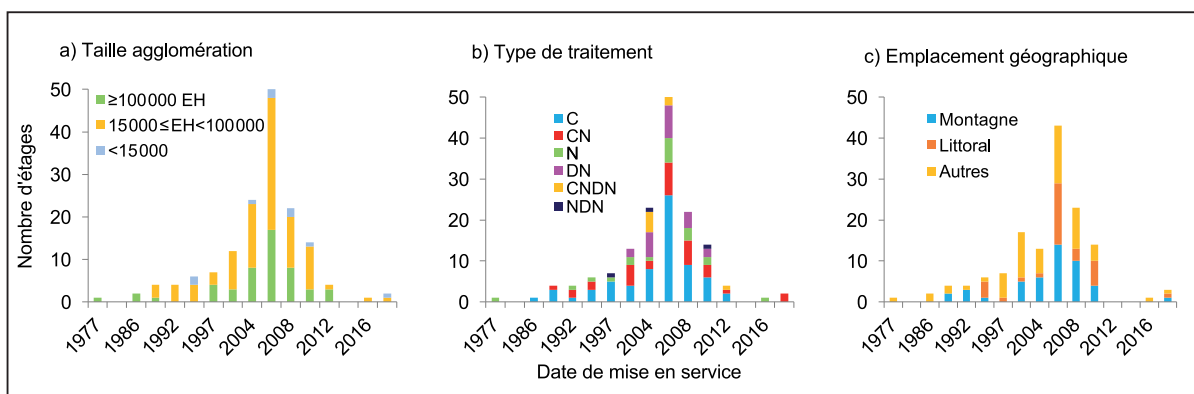
2.1. Typologies des installations de biofiltres : parc français vs installations ayant répondu au questionnaire

L'analyse de la base de données nationale des biofiltres montre que les 128 stations de traitement des eaux usées (STEU) à biofiltres construites en France ont une capacité nominale de traitement comprise entre 3000 et 6 millions d'équivalent-habitant (EH), pour une capacité nominale cumulée de 22 millions d'EH. La figure 2 décrit plus finement la typologie du parc français. On observe que 32 installations font partie du système d'assainissement de grandes agglomérations de capacité nominale $\geq 100\,000$ EH (capacité cumulée de 18,1 millions EH), 83 de moyennes agglomérations (capacité comprise entre 15000 EH et 100000 EH et cumulée de 3,74 millions EH), 13 autres de plus petites collectivités ($< 15\,000$ EH pour une capacité cumulée de 100000 EH). 75 installations (59% du parc) fonctionnent à charge variable, car elles sont situées en montagne à proximité d'un domaine skiable (zone alpine) ou du littoral (zone méditerranéenne) où la population augmente fortement de manière saisonnière. Sans doute rythmés par l'évolution de la réglementation de plus en plus exigeante (arrêté du 22 juin 2007), 63% des étages de biofiltres ont été construits entre 2005 et 2008 (96 installations). La date moyenne de mise en service est de 2006, et la capacité cumulée de traitement du parc a été multipliée par 3 par rapport à celle de 2005.

La figure 3a montre que 74% des étages de biofiltres sont placés en première étape du traitement biologique (i.e. immédiatement après la décantation primaire) : 44% sont conçus pour traiter exclusivement la pollution carbonée, 21% traitant carbone et azote simultanément, 21% traitant le carbone, 14% traitant l'azote.

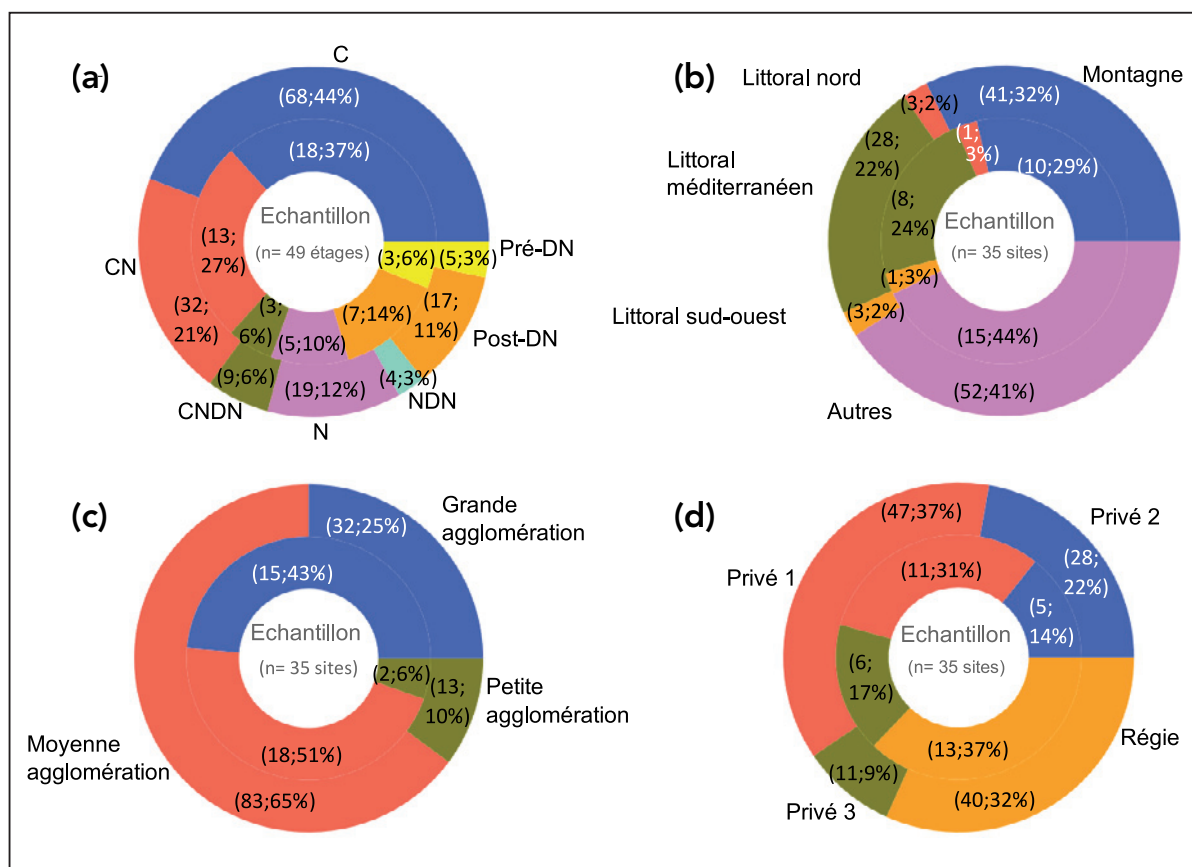
Rappelons que les premiers étages sont confrontés aux plus fortes concentrations et charges de MES. L'étage N implanté pour un traitement de l'azote est majoritairement installé à l'aval de premier étage de biofiltres (79%), mais peut aussi être amené à recevoir les effluents de sortie d'une boue activée (21%). Les biofiltres dénitrifiants (DN) sont le plus souvent implantés en dernière étape du traitement (en postdénitrification, 11%), et sont moins utilisés en prédénitrification (3% des installations).

Le taux de réponse à l'enquête a été de 33% (38 sur 114 installations en France), réduit à 31% à la suite de l'application des critères de consolidation (§ 1.3) ayant exclu trois installations. La figure 3 présente la typologie des biofiltres ayant répondu à l'enquête, confrontée à la typologie des installations du parc français. Nous observons que les valeurs prises par de nombreux paramètres caractérisant les réponses à l'enquête (répartition territoriale dont variations de charge, types de traitements, date de mise en service) sont très voisines de celles caractérisant les biofiltres du parc français, avec des différences d'au plus 3%. On note toutefois que les biofiltres traitant le carbone semblent un peu sous-représentés, alors que ceux traitant simultanément carbone et azote semblent surreprésentés, mais les différences ne dépassent pas $\pm 7\%$. Les installations des grandes agglomérations sont moins bien représentées que dans le parc français (écart de 18%) et celles des moyennes agglomérations sont surreprésentées (écarts de 14%). On estime, par la méthode des z-score, à 90% (avec une erreur de $\pm 11\%$) ou à 95% (avec une erreur de $\pm 13\%$), la probabilité statistique de retrouver les valeurs réelles du parc de biofiltres dans l'échantillon issu de l'enquête. Les résultats tirés de l'enquête donnent donc une image actuelle du parc d'installations.



C : carbone ; CN : carbone et nitrification simultanés ; N : nitrification ; DN : dénitrification ; CNDN : carbone, nitrification et dénitrification dans un même ouvrage ; NDN : nitrification et dénitrification ; EH : équivalent-habitant.

Figure 2. Distribution des dates de mise en service des biofiltres du parc français et de l'échantillon de réponses au questionnaire



pré-DN : prédénitrification ; post-DN : postdénitrification ; se reporter à la figure 2 pour les autres abréviations.

Figure 3. Caractérisation du parc de biofiltres français et de l'échantillon de réponses au questionnaire. a) Étapes de traitement, b) Répartition territoriale, c) Taille agglomération, d) Exploitant. Les valeurs font référence au nombre et au pourcentage des sites ou des étages de la catégorie concernée par rapport aux sites ou étages totaux du parc et de l'échantillon respectivement. Les cercles extérieurs représentent la distribution des caractéristiques du parc français et les cercles intérieurs représentent la distribution de l'échantillon. Privé 1, 2 et 3 représentent les trois grands groupes d'exploitation qui ont été anonymisés ici

2.2. État des lieux sur le colmatage irréversible et évolution depuis 10 ans

Le *tableau II* présente les différentes situations de colmatage irréversible rapportées en 2018, et les compare aux résultats précédemment acquis en 2007 [URROZ, 2007]. Le colmatage irréversible touche 14% (7/49) des étages de biofiltres de l'enquête, alors qu'il en touchait 73% (11/15) en 2007. Le colmatage semble donc en régression depuis 10 ans, sans doute grâce à une meilleure connaissance des facteurs responsables et à une détection plus précoce de la part des exploitants.

Le *tableau II* montre également que le colmatage concerne principalement les biofiltres situés en première étape de traitement (six étages sur 31 colmatés), et majoritairement ceux situés en traitement du carbone (quatre étages sur 18). La situation en 2007 était semblable (huit étages sur un 11 colmatés). Le colmatage irréversible concerne donc en premier lieu les biofiltres qui reçoivent les charges les plus élevées en MES ou en

DCO biodégradable (production de biomasse). Ce constat met donc en évidence l'influence de la typologie de l'effluent d'entrée.

À l'exception d'une installation, les exploitants des sites qui colmatent déclarent avoir appliqué des mesures contre le colmatage : les exploitants de quatre sites ont eu recours à des lavages chimiques à la soude, l'exploitant d'un site a réalisé une succession de lavages intensifs et l'exploitant d'un autre site aurait combiné détartrage intensif et ajout de chlore, notamment pour faire face à la présence d'algues. En 2007, seulement les exploitants de trois sites sur 11 avaient pris des mesures curatives contre le colmatage, et unanimement par lavage chimique à la soude. On en déduit qu'à ce jour une plus grande connaissance sur le problème de colmatage a été acquise par les exploitants, en particulier par le suivi des pertes de charges et de la durée des cycles de filtration et que, par ailleurs, ces exploitants recherchent des alternatives aux lavages chimiques.

Type de traitement	Proportion (%) d'étages de biofiltres colmatés (Nombre colmatés/Nombre total)		Proportion d'étages (%) ayant reçu une mesure curative (Nombre avec mesures curatives/Nombre colmatés)	
	2018 (cette étude)	2007 [URROZ, 2007]	2018 (cette étude)	2007 [URROZ, 2007]
	C	22% (4/18)	73% (8/11)	50% soude (2/4), 25% lavages successifs intensifs (1/4) 25% détassage intensif et chlore (1/4)
CN	15% (2/13)	–	50% soude (1/2) 50% rien (1/2)	–
N	0% (0/5)	100% (3/3)	–	67% soude (2/3)
CNDN	0% (0/3)	–	–	–
Pré-DN	0% (0/3)	–	–	–
Post-DN	14% (1/7)	0% (0/1)	100% soude (1/1)	–
Total	14% (7/49)	73% (11/15)	86% (6/7)	30% (3/11)

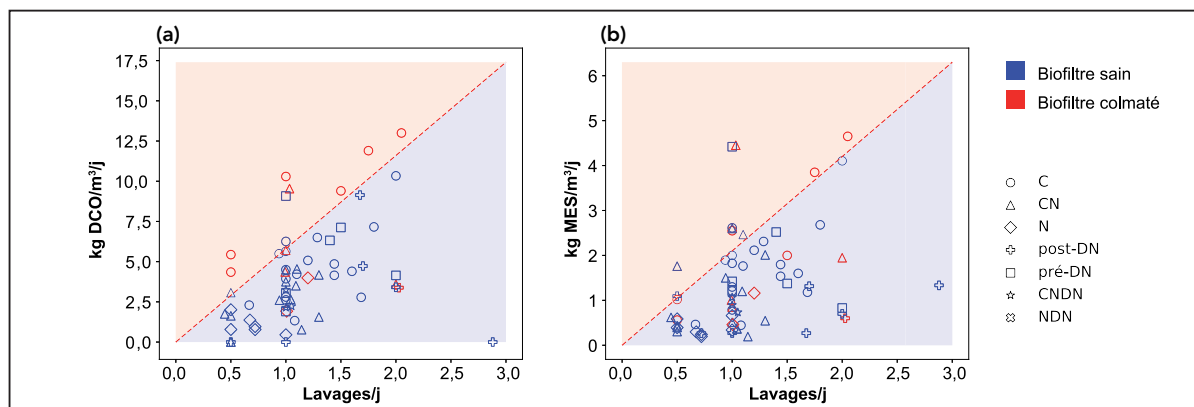
Les pourcentages totaux sont calculés par rapport au nombre total d'étages colmatés. Les rapports entre parenthèses et les pourcentages correspondants représentent le nombre d'étages colmatés sur le nombre total d'étages de chaque type de traitement.
 C : carbone; CN : carbone et nitrification simultanés; N : nitrification; CNDN : carbone, nitrification et dénitrification dans un même ouvrage; pré-DN : pré-dénitrification; post-DN : postdénitrification.

Tableau II. Caractérisation des biofiltres de l'enquête et détail sur les situations qui mentionnent actuellement un colmatage irréversible et informations sur la situation antérieure datant de 2007

2.3. Mise en évidence de paramètres responsables du colmatage

La charge volumique journalière appliquée est un paramètre très important pour dimensionner les biofiltres pour un niveau de rejet donné, et ce paramètre permet aussi de caractériser le fonctionnement des biofiltres. Elle est définie comme le flux de pollution appliqué au réacteur par jour et exprimée en kg de pollution par m³ de matériau filtrant et par jour (kg pollution/m³/j). Il est très important d'associer ce paramètre à la fréquence journalière des lavages. On pourrait aussi exprimer les charges appliquées par la durée du cycle de filtration pour s'affranchir de la fréquence de lavage et comparer des installations entre elles.

La figure 4 représente les charges volumiques journalières appliquées en DCO (figure 4a) et en MES (figure 4b) recueillies au cours de l'enquête en fonction de la fréquence de lavage (retours des eaux sales de lavages des biofiltres au traitement primaire et retours de la file boue en tête de station inclus). Les différents étages de traitement (C : carbone; CN : carbone et nitrification simultanés; N : nitrification; pré-DN : prédénitrification; post-DN : postdénitrification; CNDN : carbone; nitrification et dénitrification dans un même ouvrage; NDN : nitrification et dénitrification dans un même ouvrage) sont différenciés par des formes différentes. Les symboles colorés en bleu représentent les étages de biofiltre sans colmatage irréversible (dénommé biofiltre



DCO : demande chimique en oxygène; MES : matières en suspension. Se reporter à la figure 2 pour la signification des différents étages de traitement.
Figure 4. Charges volumiques appliquées en DCO (a) et en MES (b) en fonction de la fréquence de lavage pour les biofiltres non colmatés (bleu) et ceux colmatés (rouge). En pointillé, frontière discriminant zones de colmatage et de non-colmatage

SMART CITY

Pensez **KiO**



PERMÉABLE
AUX ONDES



KiO

le tampon
100%
composite



ANTI ROUILLE



INSONORE



ULTRA LEGER

POLIECO
GROUP

Eau potable et eaux de process

Un fabricant au service de la désinfection de l'eau depuis plus de 50 ans



Générateur d'ozone



Générateur de chlore par électrolyse du sel



Générateur de dioxyde de chlore



Système de dosage de chlore gazeux



Générateur de rayons UV

Nos solutions de traitement de l'eau sont basées sur la connaissance des métiers de nos clients.

Nous vous apportons le conseil de notre bureau d'étude et de nos experts, un service pendant la mise en œuvre de nos équipements, un service après-vente globale à partir des 55 filiales du groupe.

Experts in chem-feed and water treatment

Contact

8, rue des Frères Lumière - CS 90039 Eckbolsheim - 67038 Strasbourg Cedex 2
Tél : 03 88 10 15 10 - E-mail : contact-fr@prominent.com

www.prominent.fr

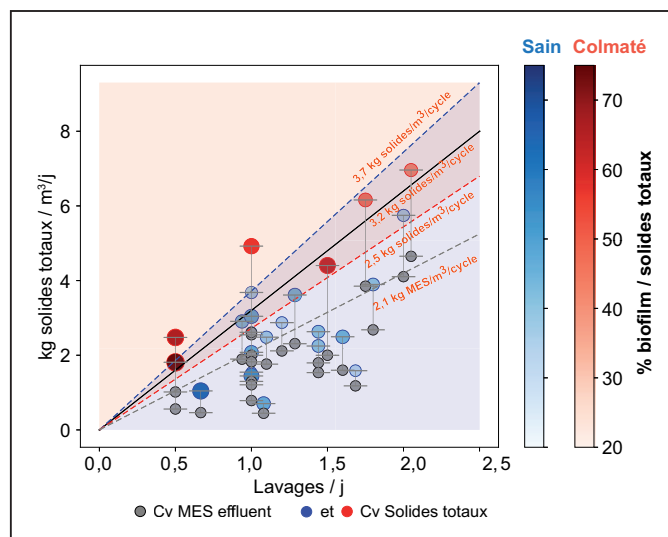
ProMinent[®]

► sain dans la suite), et les formes colorées en rouge indiquent un étage de biofiltre ayant déclaré un colmatage irréversible. Ces résultats incluent les points de fonctionnement de 69 étages de biofiltres constitués des 49 étages décrits précédemment (§ 2.1. et 2.2), complétés par sept autres conditions de fonctionnement de sites de l'échantillon, et ceux de 13 autres étages d'installations situées à l'étranger. Le colmatage a concerné 11 situations sur 69 points de fonctionnement, dont six biofiltres carbone, trois CN, un N et un post-DN.

Une analyse de covariance (Ancova) des charges appliquées aux biofiltres C a montré que le jeu de données des installations saines est indépendant du jeu de données composé par les installations colmatées. L'application d'un modèle discriminant linéaire a de plus permis de déterminer la frontière (i.e. la charge volumique journalière maximale à laquelle peut faire face un biofiltre C avant de colmater) délimitant la zone susceptible de conduire au colmatage (zone rouge) et la zone de non-colmatage (zone bleue). Les pentes des frontières de discrimination sont estimées à 5,8 kg DCO kg/m³/cycle et à 2,1 kg MES/m³/cycle (figure 4). Ces valeurs confortent les valeurs utilisées par certains experts, d'environ 6 kg DCO/m³/j et de 2 kg MES/m³/j pour un lavage par jour [CANLER et DURAND, 1996]. Il n'a malheureusement pas été possible d'étendre ce type d'analyse aux étages de traitement différents de l'étage carbone.

On observe toutefois que certaines installations colmatées ne respectent pas la frontière de discrimination, car elles fonctionnent à des couples Cv/fréquence de lavage statistiquement dans la zone saine (trois installations pour les MES). Après vérification de ces valeurs, nous avons suspecté que d'autres facteurs étaient à l'origine de telles observations : par exemple, la granulométrie et son évolution dans le temps due à l'attrition du matériau, le volume de matériau non vérifié (plus faible en raison des pertes), la vitesse en eau durant la filtration, la position du biofiltre dans la filière, les vitesses en eau et en air durant les lavages. Cependant, l'analyse approfondie de ces facteurs n'a pas permis d'apporter des explications à ce colmatage prématuré. Seul le rapport DCO/MES de l'eau à traiter par les biofiltres était élevé (DCO/MES > 3,2) pour ces cas d'étude échappant à la règle de la frontière, nous avons fait l'hypothèse d'un pouvoir colmatant différent entre MES de l'eau d'entrée et la biomasse formée par la croissance cellulaire. En effet, la proportion de cette biomasse dans le filtre sera d'autant plus importante que le rapport DCO/MES sera élevé.

Pour aller plus loin dans l'interprétation des données, et notamment préciser la différence de comportement entre les particules issues des effluents et celles originaires de la biomasse dans la contribution au colmatage irréversible, nous avons estimé la quantité de solides susceptibles d'être accumulés au sein des biofiltres en prenant en compte la masse de matières en suspension piégée (filtration) et la biomasse développée par croissance cellulaire (équation 4), en modulant en fonction de la typologie de l'effluent à traiter. La masse de solides est représentée figure 5 par les symboles colorés, bleus pour les biofiltres sains et rouges pour les biofiltres colmatés. Une taille de symbole plus importante et une intensité de couleur plus forte indiquent une proportion majoritaire de la biomasse au sein des solides retenus dans la porosité du biofiltre, alors que des formes plus petites (et couleur plus claire) indiquent que les solides totaux sont majoritairement constitués de MES. Les symboles de couleur grise représentent les charges volumiques journalières des matières en suspension (Cv MES) provenant exclusivement de l'eau usée d'entrée et piégées par filtration (idem que sur la figure 4b). La quantité de biomasse produite par m³ de matériau pendant un cycle de filtration correspond donc à l'écart entre les Cv MES effluents (symboles gris) et les Cv Solides totaux (symboles colorés).

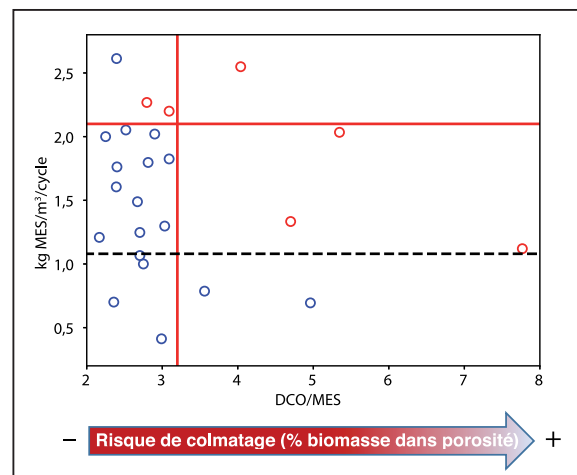


Cv : charge volumique.
Figure 5. Solides totaux (provenant des MES de l'effluent et de la biomasse produite) dans la porosité du massif filtrant des biofiltres carbone en fonction de la fréquence de lavage. La taille et la couleur des symboles sont modulées selon la proportion de biomasse par rapport aux solides totaux (échelle de 20% à 70%). La droite noire est la frontière de discrimination générée à partir des solides totaux. La droite en pointillés gris est la frontière de discrimination générée exclusivement à partir de MES appliquées sur le biofiltre (figure 4b). Les droites en pointillés rouges et bleus correspondent aux frontières marquant le colmatage par accumulation élevée de biofilm et le colmatage par stockage élevé des matières en suspension respectivement

L'application d'un modèle discriminant linéaire appliqué aux biofiltres C permet de déterminer la frontière (i.e. kg de solides totaux/m³/j) en deçà de laquelle un biofiltre C peut fonctionner sans colmatage irréversible (zone bleue). La pente de cette frontière de discrimination a été estimée à 3,2 kg solides totaux/m³/cycle (droite noire). En modulant avec les proportions de biofilm ou de matières en suspension, cette approche permet de définir une première frontière marquant le colmatage atteint à cause d'une accumulation trop élevée de biofilm (pointillés rouges) et une deuxième frontière marquant le colmatage provenant du stockage des matières en suspension avec peu de biofilm produit (pointillés bleus). On met donc en évidence l'existence d'une zone de superposition dans laquelle le colmatage serait déclenché par la quantité de biofilm produit alors que la charge en matières en suspension maximale n'a pas été atteinte. Un point qui l'illustre parfaitement est situé dans la zone bleue à faible probabilité de colmatage d'origine MES de l'eau usée (cf. point de coordonnées 4,5 kg solides totaux/m³/j et 1,5 lavage/j), mais qui colmate en raison d'une présence de biofilm importante. À l'opposé, on peut trouver une installation saine bien que dans la zone rouge à forte probabilité de colmatage (cf. point de coordonnée 3,7 kg solides totaux/m³/j et 1 lavage/j), mais qui ne colmate pas en raison d'une présence de charge MES plus importante. Ces résultats suggèrent que les contraintes hydrauliques nécessaires pour éliminer les matières en suspension accumulées (provenant de l'eau) dans le biofiltre sont moins fortes que celles nécessaires pour détacher le biofilm. Pour des eaux usées à faible rapport DCO/MES on pourrait donc augmenter la charge volumique du biofiltre jusqu'à des valeurs de 3,7 kg solides totaux/m³/j, soit 2,6 kg MES/m³/j supposant DCO/MES = 2,4 et un lavage par jour. Cependant, travailler dans cette gamme de valeurs limites confère peu de sécurité avant un colmatage irréversible, il est alors d'autant plus important de mener une exploitation soutenue pour travailler dans cette gamme de charge.

La variable « solides totaux » n'étant pas facilement mesurable en exploitation, nous avons traduit ce paramètre à l'aide du ratio DCO/MES à l'entrée du biofiltre. La figure 6 représente la charge volumique journalière en matière en suspension en fonction du ratio DCO/MES de l'eau appliquée au biofiltre (ce qui intègre la croissance de la biomasse). Elle traduit l'influence de la typologie de l'eau usée sur la survenue du colmatage irréversible. On détermine que lorsque le ratio DCO/MES est supérieur à 3,2 (trois cas sur cinq), le risque de colmatage irréversible est élevé à partir d'une charge

volumique journalière de 1,1 kg MES/m³/cycle. En revanche, pour un ratio DCO/MES compris entre 2 et 3,2, la limite de 2,1 kg MES/m³/cycle permettrait de limiter le risque de colmatage. Ces valeurs seuils s'entendent sous réserve de vitesses en eau suffisantes (> 2 à 3 m³/m²/h).



DCO : demande chimique en oxygène ; MES : matières en suspension.
Figure 6. Charge volumique appliquée par durée de cycle de filtration pour différents ratios DCO/MES. Biofiltres non colmatés (en bleu) et ceux colmatés (en rouge) - Biofiltre Carbone - Premier étage

3. Indicateurs de colmatage, mesures préventives et curatives - Synthèse

Des lavages inefficaces ou pas assez fréquents entraînent inéluctablement un biofiltre vers un colmatage irréversible. L'efficacité des lavages est à surveiller (§ 3.1.) et plusieurs descripteurs suivis régulièrement permettent de détecter des signes précurseurs permettant d'intervenir de manière précoce avant la mise en place du colmatage irréversible (§ 3.1.). Une fois le colmatage irréversible installé, certaines mesures curatives ont montré leur efficacité (§ 3.2.). Le tableau 1 présente des recommandations à mettre en œuvre pour prévenir, diagnostiquer et corriger le colmatage irréversible.

3.1. Mesures préventives

Des charges hydrauliques trop faibles favorisent le remplissage rapide des premières couches de matériau. Aussi, il est donc nécessaire de maintenir une charge hydraulique supérieure à 2-3 m³/(m²·h) pour éviter de déclencher un lavage prématuré. Pour garantir cette vitesse à tout moment dans la journée, il est nécessaire d'adapter le nombre de cellules de biofiltres en traitement en fonction du débit. Selon la configuration hydraulique de la station d'épuration, une recirculation des eaux traitées peut être nécessaire.

Il est vivement recommandé de vérifier régulièrement le débit des pompes d'eau de lavage et les débits des compresseurs d'air de lavage. On veillera également à adapter les séquences des lavages (durée de chacune des phases du lavage, nombre de séquences et vitesse en eau et air de lavage de chaque phase) en fonction de la sensibilité des cellules de biofiltre au colmatage. Les lavages intensifs réguliers avec une durée et des vitesses en eau et/ou air plus élevées sont également préconisés, mais avec un suivi spécifique en raison de risque de perte de matériau. Il convient d'ajuster leur fréquence en fonction de la sensibilité au colmatage de l'installation tout en prenant en compte qu'une fréquence plus élevée suppose un volume d'eau propre et d'eaux sales plus important. Il faut s'assurer que les volumes des bâches, ainsi que les pompes de vidange, le permettent bien. De plus, il faut vérifier que les vitesses imposées au décanteur primaire sont bien compatibles avec son dimensionnement pour ne pas appliquer des vitesses en eau supérieures aux valeurs limites, ce qui entraînerait des dépôts de matières en suspension.

Dans le cas d'un traitement aéré, l'air nécessaire au procédé doit être suffisant pour traiter la pollution carbonée et azotée, il est important de vérifier les compresseurs et vérifier que ceux-ci fournissent bien le débit d'air imposé par la consigne et que chaque biofiltre reçoive bien le débit d'air prévu.

3.2. Mesures curatives

Dans tous les cas, il faut identifier le ou les facteurs qui ont entraîné le colmatage irréversible pour éviter que la situation ne se reproduise. Lorsque le colmatage irréversible est déjà installé, l'exploitant n'a pas d'autre choix que d'appliquer une mesure curative qui souvent se traduit par la forte réduction de l'activité biologique au sein du filtre en plus de la diminution des solides (MES, résidus de polymères). Ces mesures nécessitent un isolement de la cellule colmatée (arrêts d'alimentation en eau, voire d'apports en air).

Le lavage chimique à la soude, bien que lourd à mettre en œuvre pour l'exploitant, est une solution efficace et rapide une fois le site équipé avec le matériel nécessaire. Le protocole simplifié consiste au trempage du biofiltre dans une solution de NaOH à pH > 10 pendant au moins 24 heures, et de procéder à une agitation par injection d'air de lavage jusqu'à ce que le pH se stabilise. Il est précédé d'un lavage normal et suivi de lavages normaux et intensifs. L'ajout d'un produit antimousse est parfois nécessaire pour limiter les débordements.

Une autre alternative pour combattre le colmatage irréversible est d'appliquer des conditions d'anaérobiose dans les biofiltres pendant environ un mois, sans alimentation en eau et en air. Bien que longue, cette mesure est intéressante sur le plan financier et environnemental. Mais elle n'est envisageable que pour les installations fonctionnant à des charges hydrauliques et polluantes inférieures aux charges nominales pour permettre un arrêt de longue durée de la cellule colmatée. Lorsque le colmatage irréversible est récent ou peu profond, un arrêt de deux semaines peut être suffisant. Si la durée est insuffisante, le colmatage irréversible revient peu de temps après (20 jours).

À la suite de l'application d'une mesure curative, la cellule de biofiltre traitée doit fonctionner à vitesse réduite (3 ou 4 m³/(m²·h)) pour se réensemencer. Dans les installations où l'alimentation des biofiltres a lieu à l'aide d'un canal d'alimentation commun, le biofiltre sera alimenté par intermittence, et en augmentant progressivement la durée de la phase filtration. Pendant cette phase, la qualité de l'eau traitée doit être surveillée.

Conclusion

Les résultats obtenus dans le cadre de ce travail mené sur le colmatage irréversible montrent que le phénomène est de moindre ampleur qu'il y a 10 ans, mais qu'il concerne encore plusieurs biofiltres placés en première étape de traitement biologique. Pour des filtres traitant le carbone en premier étage, les dimensionnements doivent impérativement respecter des vitesses en eau minimales de 2-3 m³/(m²·h) et des charges volumiques maximales de 5,8 kg DCO/m³ matériau/cycle et de 2,1 kg MES/m³ matériau/cycle. Les charges appliquées doivent surtout être adaptées en fonction des fréquences de lavage. La typologie de l'effluent à traiter est également à prendre en compte, car pour les installations fonctionnant avec des ratios DCO/MES supérieurs à 3,2, le risque de colmatage irréversible est bien réel pour des charges volumiques supérieures à 1,1 kg MES/m³ matériau/cycle. Le travail a également permis de rappeler les indicateurs visuels et de préciser les indicateurs métrologiques qui permettent de détecter la dérive vers le colmatage, et de le détecter précocement. Enfin, cet article rappelle et priorise les méthodes préventives et curatives de lutte contre le colmatage. Les perspectives de ce travail concernent l'approfondissement des phénomènes qui se déroulent pendant les lavages, en particulier la compréhension des interactions hydrauliques - détachement de biofilm et des agrégats solides.

Remerciements

Les auteurs remercient vivement les agences de l'eau, maîtres d'ouvrage, exploitants et constructeurs qui ont contribué à recueillir les réponses au questionnaire.

Bibliographie

BARJENBRUCH M. (2007) : « Benchmarking of BAF plants: operational experience on 40 full-scale installations in Germany ». *Water Science and Technology*; 55(8-9) : 91-8.

BOLLER M., KOBLER D., KOCH G. (1997) : « Particle separation, solids budgets and headloss development in different biofilters ». *Water Science and Technology*; 36(4) : 239-47.

CANLER J.P., DURAND C. (1996) : *Étude du Biostyr de la station d'épuration de Saint-Fons (69)*. Rapport Cemagref L. 190, 207 p.

CANLER J.P., PERRET J.-M. (1994) : *La décantation lamellaire des boues activées*. FNDAE n° 18, 46 p.

HUISMAN L. (2004) : *Rapid filtration*. Delft University of Technology. Disponible en ligne : https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/Rapid_filtration_TU2004.pdf, 198 p.

LE BIHAN Y., LESSARD P. (2000) : « Monitoring biofilter clogging: biochemical characteristics of the biomass ». *Water Research*; 34(17) : 4284-94.

MTES (MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET SOLIDAIRE) (2018) : *Portail d'information sur l'assainissement communal* (mise à jour 2019). Disponible en ligne : <http://assainissement.developpement-durable.gouv.fr>

OUELLET J. (1994) : *Mise au point d'un logiciel de contrôle des procédés de traitement des eaux usées (unité de biofiltration)* [thèse]. Université du Québec, 279 p.

ROCHER V., PAFFONI C., GONÇALVES A., AZIMI S., GOU-SAILLES M. (2008) : « La biofiltration des eaux résiduaires urbaines : retour d'expérience du Siaap. » *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*; 21(4) : 475-85.

URROZ M. (2007) : *Étude du colmatage d'une installation pilote Biostyr en nitrification tertiaire basée à Saint-Fons (69)*. Rapport de fin d'études au Cemagref, 61 p. et annexes.

LEM : Partenaire des publications de l'Astee depuis plus de 25 ans

LEM

LES ÉDITIONS MAGENTA

12, avenue de la Grange - 94100 St-Maur-des-Fossés | Tél. 01.55.97.07.03 | Email : l.e.m@wanadoo.fr



BEREST est un Groupe de sociétés d'Ingénierie spécialisées en infrastructure et Environnement

INGÉNIEURS CIVILS DES COLLECTIVITÉS PUBLIQUES

MEMBRE CINOV -Qualifié OPQIBI

www.berest.fr

Génie de l'eau et de l'environnement – Voirie –
Assainissement Eau potable – Traitement des eaux usées –
Éclairage Public Desserte téléphonique – Génie Civil –
Infrastructures routières Réseaux divers – Diagnostic des
réseaux – Équipements sportifs Études d'impact –
Traitements des déchets – Lotissements – Z.A.C.

Holding B.E.R.E.S.T SAS

8 rue Girlenhirsch – B.P. 30012
67401 ILLKIRCH Cédex Tél. :
03 88 65 36 06
berest@berest.fr

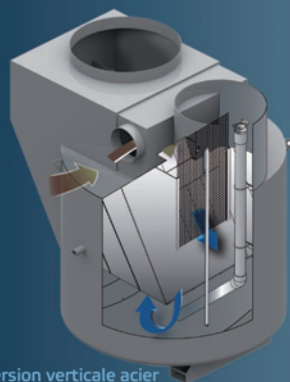
FILIALES :

BEREST RHIN RHONE à Colmar-Besançon
BEREST LORRAINE à Phalsbourg-Yutz-
Villers les Nancy-Chalons en Champagne
BEREST BOURGOGNE à Dijon



Techn*eau*

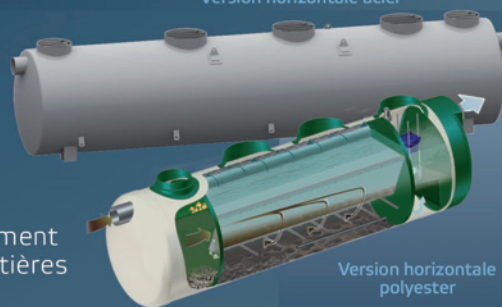
Traitement des eaux de ruissellement



Version verticale acier

Décantation & dépollution

> Nos solutions pour capter efficacement
les micropolluants fixés sur les matières
en suspension.



Version horizontale acier

Version horizontale polyester

Techneau Z.A. La Chevalerie
50570 Marigny-Le-Lozon - FRANCE

www.techneau.fr / info@techneau.com / +33 (0)2 33 56 62 08



weber innove
pour vos travaux
d'assainissement



**we
care**

weberep VM 265 et weberep VM 266

Mortiers de réparation renforcés de fibres métalliques amorphes pour réseaux hydrauliques souterrains visitables en coque mince

- Réalisation de chemisages sans treillis soudé
- Réduction de l'épaisseur de chemisage à réaliser (à partir de 3 cm)
- Pénétrabilité réduite et gain de temps sur chantier
- Résistances à la compression et à la flexion élevées ($Fr1 = 2.7 \text{ MPa}$)
- Projetable sur grande longueur ($> 80 \text{ m}$)



www.weber.fr et Saint-Gobain Weber sur smartphone



Retrouvez-nous sur
les réseaux sociaux

weber
SAINT-GOBAIN