



HAL
open science

Prévoir et prévenir la dérive vers le colmatage d'un biofiltre

Beatriz Gonzalez Vazquez, Jean-Marc Choubert, Jean-Pierre Canler, Etienne Paul

► **To cite this version:**

Beatriz Gonzalez Vazquez, Jean-Marc Choubert, Jean-Pierre Canler, Etienne Paul. Prévoir et prévenir la dérive vers le colmatage d'un biofiltre. TSM. Techniques Sciences Méthodes – Génie urbain, génie rural, 2022, 3, pp.49-60. <10.36904/tsm/202203049>. <hal-03632533v1>

HAL Id: hal-03632533

<https://hal.science/hal-03632533v1>

Submitted on 6 Apr 2022 (v1), last revised 24 Jul 2025 (v2)

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-NC-ND 4.0 - Attribution - Non-commercial use - No Derivative Works - International License

PREVOIR ET PREVENIR LA DERIVE VERS LE COLMATAGE D'UN BIOFILTRE

PREDICT AND PREVENT THE DRIFT TOWARDS CLOGGING OF A BIOFILTER

González Vázquez Beatriz^{1,2}, Choubert Jean-Marc^{1*}, Canler Jean-Pierre¹, Paul Etienne²

¹INRAE, UR REVERSAAL, 5 rue de la doua, F-69625, Villeurbanne, France – jean-marc.choubert@inrae.fr

²TBI- INSA de Toulouse, 135 avenue de Rangueil, 31077, Toulouse, France, – b_gonzal@insa-toulouse.fr

*5 rue de la doua, F-69625, Villeurbanne, France – jean-marc.choubert@inrae.fr +33 472208787

CATEGORIE DE L'ARTICLE : *Recherche appliquée*

FORMAT DE L'ARTICLE : *Article scientifique/technique*

TABLE DES MATIERES : *A compléter manuellement (pas de table des matières automatique)*

Résumé / Abstract.....	p. 2
Introduction.....	p. 3
1. Matériels et méthodes.....	p. 5
1.1. Description de l'installation par biofiltration étudiée.....	p. 5
1.2. Analyse des données.....	p. 6
1.3. Calculs des différents descripteurs de fonctionnement.....	p. 7
2. Résultats et discussion.....	p. 9
2.1. Analyse de la dynamique de perte de charge pour repérer la dérive vers le colmatage irréversible	p. 9
2.2. Interprétation des données : quelle relation avec les charges appliquées?.....	p. 11
2.3. Quelle stratégie pour prévoir le colmatage irréversible?.....	p. 14
Conclusion.....	p. 16
Bibliographie.....	p. 17

Résumé

La biofiltration est une technologie compacte, efficace pour le traitement des effluents urbains, et bien implantée en France et dans le monde. Certaines installations sont toutefois régulièrement touchées par un colmatage irréversible nécessitant des interventions lourdes pour rétablir la capacité de traitement. Compte-tenu de la multiplicité des causes possibles et du caractère dynamique du fonctionnement des installations, détecter la dérive vers le colmatage irréversible nécessite une très bonne connaissance des processus, du dimensionnement, de l'historique de fonctionnement et des limites d'exploitation des installations.

Le travail présenté ici propose une méthode systématique d'analyse multicritères des données de fonctionnement d'une installation de biofiltration en vue de maîtriser les étapes menant au colmatage sans atteindre le stade irréversible. Il définit les descripteurs à suivre et leur fréquence de détermination, et présente la méthode de définition de l'état de référence auquel les conditions de fonctionnement doivent être comparées. Cette méthode est illustrée avec des données couvrant une période de plus de deux ans de suivi d'une installation réelle. Nous avons montré que l'analyse de la survenue du colmatage irréversible et la détermination des causes possibles peuvent être réalisées à partir de l'analyse minutieuse des charges hydrauliques, des charges volumiques en DCO et en MES, des concentrations de l'eau à traiter à l'entrée de la biofiltration et de la fraction biodégradable, de la durée de filtration, ou encore à travers l'analyse des conditions de fonctionnement du traitement primaire en intégrant l'impact des retours et plus particulièrement les eaux de lavage des biofiltres. La méthode s'appuie également sur des critères créés spécifiquement pour confirmer et situer le colmatage irréversible dans le temps, tels que les pertes de charge et le volume de vide (porosité) au début d'un cycle de filtration (après lavage). La prédiction et la prévention de la survenue d'un colmatage irréversible par cette méthode permet l'amélioration des performances épuratoires, la fiabilité du fonctionnement de la biofiltration et donc la réduction des coûts d'exploitation et de l'impact environnemental.

Mots-clés : Traitement des eaux usées, biofiltration, colmatage irréversible, analyse de données

Abstract

Biofiltration is a compact and efficient technology for the treatment of urban effluents, and is well established in France and worldwide. However, some facilities are regularly affected by irreversible clogging, requiring heavy operations to restore the treatment capacity. Given the multiplicity of possible causes and the dynamic of the facilities, detecting the drift towards irreversible clogging requires a very good knowledge of the processes, the design, the history of the operating conditions, and the limits of the facilities.

The work presented here proposes a systematic method for multi-criteria analysis of the operating data of a biofiltration facility in order to control the events of irreversible clogging. It defines the descriptors to follow and their frequency of determination. It presents the method for defining the reference state to which the operating conditions should be compared. This method is illustrated with data covering a period of operations of more than two years of a full-scale plant. We have shown that the analysis of the occurrence of irreversible clogging and the determination of the possible causes can be carried out through the careful analysis of the hydraulic load, the COD and/or TSS volume loads, the concentrations and the biodegradable fraction of the water to be treated, the filtration duration, or through the analysis of the operating conditions of

the primary treatment (backwash water). The method also relies on criteria specifically created to confirm and locate irreversible clogging over time, such as pressure drops and void volume (porosity) at the beginning of a filtration cycle (after washing). Using this method, predicting the occurrence of irreversible clogging will reduce the constraints and costs of operations, as well as the environmental impact of the biofiltration process..

Keywords: Wastewater treatment, biofiltration, clogging, data analysis

Introduction

Avec environ 500 installations dans le monde et plus d'une centaine en France, la biofiltration est un procédé à biofilm permettant de traiter le carbone et l'azote des eaux usées urbaines. En France, il constitue le deuxième procédé biologique en terme de capacité de traitement. La biofiltration consiste en un lit de matériau granulaire immergé, support au développement de biomasse, qui assure la conversion des polluants biodégradables. Un encrassement progressif du lit granulaire a lieu au cours du traitement en raison de la rétention des matières particulaires contenues dans l'effluent à traiter, mais également en raison de production de biomasse lors de la dégradation biologique des polluants dissous. Des séquences de lavages à l'air et/ou à l'eau sont régulièrement appliquées à de très fortes vitesses (plusieurs dizaines de m/h pendant plusieurs minutes) pour détacher et évacuer les matières hors du lit (ex. particules préalablement filtrées, biofilm développé, agrégats formés). Cette étape permet de retrouver la perméabilité nécessaire au traitement qui est ensuite réalisé avec la fraction de biomasse résiduelle (couche basale de biofilm) et les capacités de filtration restaurées pour un nouveau cycle de filtration. Malgré les très fortes énergies dissipées lors du lavage, une partie de la matière accumulée peut ne pas être extraite. Un lavage doit être capable d'extraire les solides et éviter ainsi leur accumulation dans le temps. Le déséquilibre entre accumulation et l'évacuation de matières solides pendant plusieurs cycles conduit à une accumulation progressive de matière dans le lit filtrant et donc à une réduction de la fraction de volume de vide qui dès lors n'est plus disponible pour le traitement (Figure 1). On parle alors de colmatage précoce qui est, pour un temps au moins, réversible [SHI et al., 2014]. Pour évacuer davantage la matière stockée, l'exploitant doit réduire la durée des cycles de traitement pour diminuer les charges appliquée (donc augmenter la fréquence des lavages, avec un risque d'accentuer le colmatage s'il est mal maîtrisé en raison d'une mauvaise gestion des retours en tête de station). Cette situation augmente les coûts d'exploitation à cause de l'accroissement des volumes d'eau de lavage, de temps de maintenance, de la fréquence des arrêts, de la perte de matériau [LE BIHAN et al., 2000].

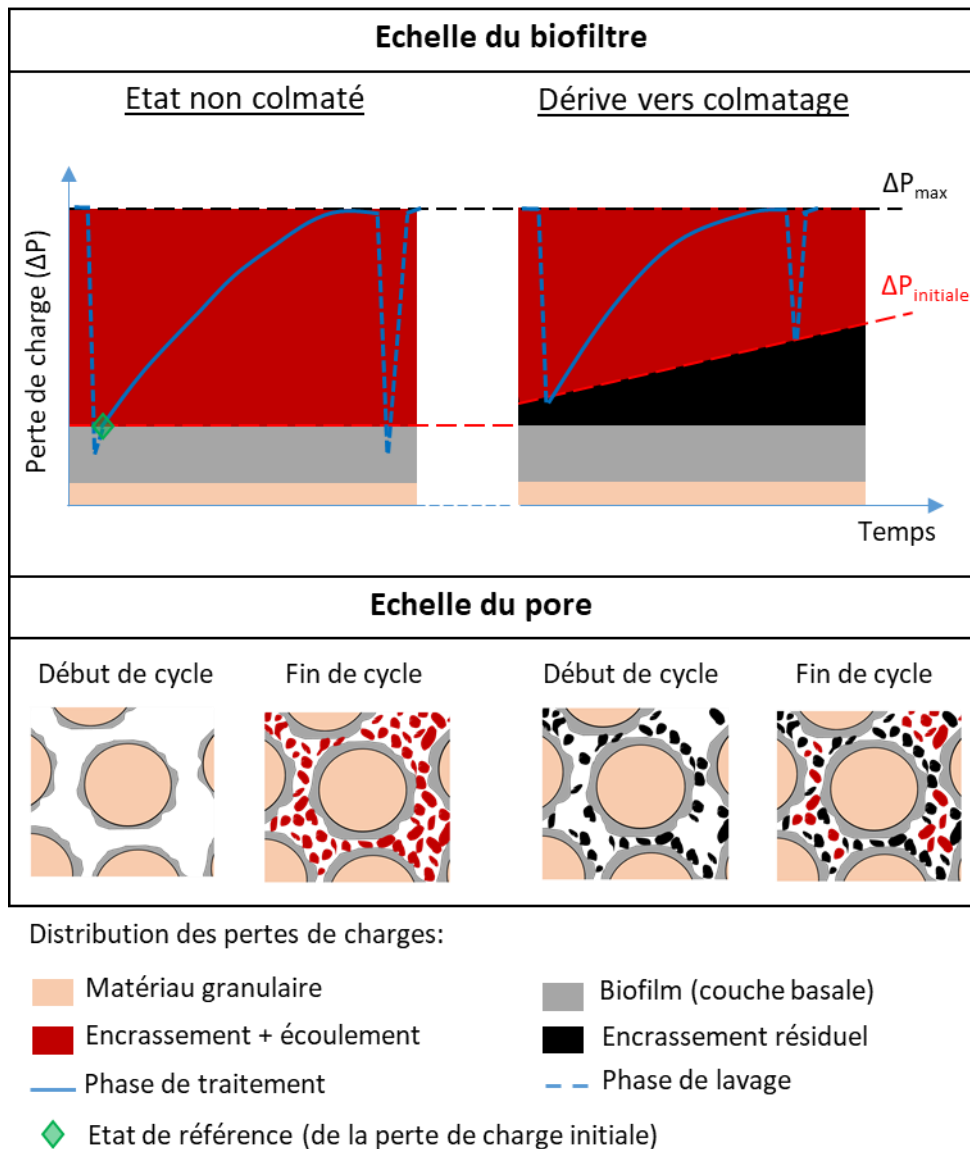


Figure 1 : Schéma de l'impact du colmatage sur la perte de charge au passage dans un biofiltre et sur le remplissage du volume de vide entre les grains

Lorsque la situation d'accumulation perdure trop longtemps, la matière résiduelle dispose de conditions favorables pour s'agréger et se compacter (ie se consolider). La consolidation est une compression des solides qui comble les espaces interstitiels par de la matière densifiée [CASEY, 2007; PAUL et al., 2012, LASPIDOU et al., 2004]. Le biofilm devient résistant aux contraintes mécaniques des lavages. L'application de solutions chimiques est alors absolument nécessaire pour évacuer cette matière agrégée, et retrouver le volume de vide initial. On parle alors de colmatage irréversible, phénomène qui a touché 14% des premiers étages de biofiltres en France en 2018 [GONZALEZ VAZQUEZ et al., 2020]. Le colmatage irréversible génère des contraintes en exploitation, pouvant aller jusqu'à l'augmentation de l'impact environnemental (ex. dégradation de la qualité du rejet, lavage à la soude).

Maitriser les charges volumiques en DCO et en MES appliquées à chaque cycle de traitement est un facteur de contrôle pour limiter l'accumulation et la consolidation de matières difficiles à évacuer lors des lavages. Les charges volumiques de dimensionnement, la fréquence et la séquence de lavages, sont spécifiques à chaque technologie en raison du matériau support (nature, taille, forme, ...). Toutefois, GONZALEZ VAZQUEZ [2020] ont montré que dépasser les charges de 5,8 kg DCO/m³ matériau/cycle de filtration et de 2,1 kg MES/m³ matériau/cycle fait courir un risque important de colmatage irréversible. Ces valeurs sont plus faibles pour certaines natures d'effluents, notamment dans le cas d'effluents riches en matière organique soluble biodégradable (DCO/MES > 3,2) entraînant une plus grande accumulation de biomasse microbienne qui a un pouvoir colmatant supérieur à celui des particules des eaux usées.

Mesurer la pression au pied du filtre, la perte de charge globale traduisant la résistance à l'écoulement au sein du matériau granulaire, est une pratique désormais répandue permettant de limiter la durée de filtration lorsque la pression de sécurité est atteinte. Elle est corrélée au niveau d'occupation des vides, donc au développement du biofilm et à la matière accumulée (Figure 1). Cependant, lorsqu'une résistance à l'écoulement est identifiée, le colmatage irréversible est souvent déjà installé. Pour repérer la matière accumulée, il est conseillé de mesurer la perte de charge atteinte en début de cycle (après un lavage) à débit fixé (par exemple lors du rinçage). Cette valeur est à comparer à l'état de référence, par exemple les valeurs au démarrage de l'installation ou lors de l'application de lavages à la soude à différentes vitesses en eau, ou dans les périodes où les fréquences de lavage sont adaptées aux charges appliquées. Interpréter ces données reste difficile compte-tenu des variations faibles à détecter parmi la perte de charge totale, de la variabilité induite par l'exploitation (hydraulique, charges appliquées, nature de l'eau à traiter, niveau de matériau, de la fréquence et de l'efficacité des lavages). C'est précisément sur l'analyse de ce signal que cet article apporte une analyse approfondie.

Le procédé de biofiltration a fait l'objet de plusieurs articles scientifiques, notamment sur les performances épuratoires et le vieillissement des ouvrages [BARJENBRUCH, 2007; FARABEGOLI et al., 2009; AZIMI et al., 2010], le choix des matériaux [MOORE et al., 2001; YANG et al., 2001; FARABEGOLI et al., 2004; OSORIO et al., 2006; YAN et al., 2010], sur l'influence des conditions de fonctionnement [VIOTTI et al., 2002; LI et al., 2013]. Malheureusement seules quelques sources [GONÇALVES et al., 1996; BOLLER et al., 1997; URROZ, 2007; GONZALEZ VAZQUEZ et al., 2020] décrivent le comportement des solides en lit filtrant. Ces travaux ne donnent pas de façon claire la méthodologie de diagnostic et d'opération pour éviter les colmatages irréversibles.

Le travail présenté ici vise à donner un protocole pour repérer les phénomènes d'accumulation de matière en biofiltration, et à mettre en évidence la dérive vers le colmatage. Il propose des évolutions des paramètres de fonctionnement et propose ensuite des recommandations permettant de traiter les informations de manière hiérarchisée. Il s'appuie sur une analyse fine des données issues d'une installation réelle, opérée pendant plus de 2 ans et ayant montrée des colmatages fréquents.

1. Matériels et méthodes

1.1. Description de l'installation par biofiltration étudiée

Le protocole de diagnostic du colmatage a été appliqué à une installation de biofiltration située en France, et rencontrant 1 à 2 colmatages irréversibles par an. Comparée au dimensionnement, l'installation fonctionnait en surcharge de DCO et de MES pour respectivement 93 j/an et 40 j/an.

La figure 2 présente la filière de traitement par biofiltration qui comprend les prétraitements et un décanteur lamellaire primaire physico-chimique en amont de la biofiltration définie pour le traitement de la pollution carbonée. Les biofiltres fonctionnent à co-courant ascendant eau-air, y compris pour les lavages. Les positions des débitmètres, capteurs et échantillonneurs sont également schématisés sur la Figure 2. Le Tableau 1 détaille les caractéristiques de dimensionnement et de fonctionnement de l'installation ainsi que celles du lit filtrant constitué de matériaux en argile expansée de forme sphérique.

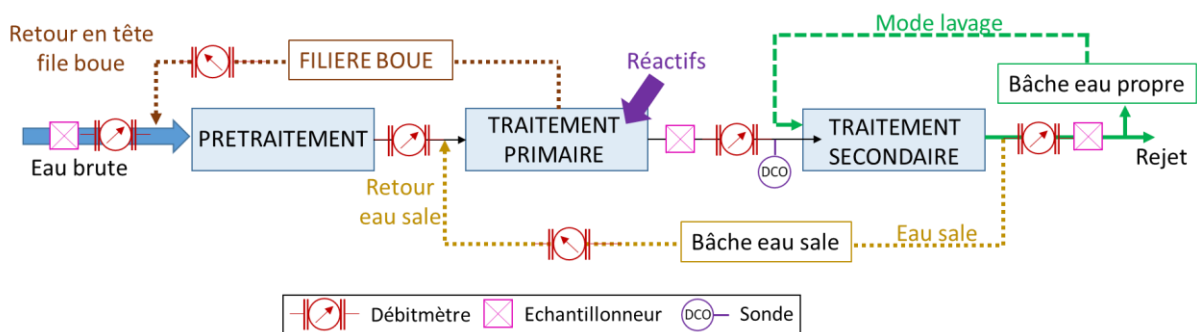


Figure 2 : Schéma simplifié (procédés, équipements) de la filière biofiltration construite sur la station d'épuration étudiée

Le nombre de cellules de biofiltres en production et le déclenchement d'un lavage sont régulés automatiquement en fonction de différents paramètres intégrés hiérarchiquement dans l'automate comme mentionné dans le Tableau 1. L'aération est asservie au débit de l'eau d'entrée en biofiltration. Le débit de chacune des cellules de biofiltre est déterminé en divisant le débit total par le nombre de cellules de biofiltres en filtration à chaque instant. Des débitmètres supplémentaires présents sur les retours de la file boue et des eaux sales de lavage des biofiltres et une sonde DCO ont permis de caractériser en continu la qualité de l'eau décantée (Figure 2). La mesure de la sonde DCO a été validée avec les résultats d'analyse chimiques (selon les méthodes standards) sur échantillons moyens 24h. Les concentrations en matière en suspension sont issues de mesures sur échantillons moyens 24h réalisées 3 jours/semaine. Selon les variables le pas d'échantillonnage des mesures est compris entre 2 et 0,17 minutes.

1.2. Analyse des données

Des descripteurs spécifiques sont calculés à partir des données brutes issues de nombreux fichiers de fonctionnement de l'installation et enregistrées au pas de temps de la seconde ou de la minute selon les capteurs (Figure 2). C'est le cas par exemple des mesures de débits, des temps de marche de moteurs, de l'état des vannes, ... Ces descripteurs sont déterminés soit à un instant précis (par exemple les pertes de

charge au début du cycle de filtration), soit pendant la durée d'un cycle de traitement ou de lavage. En effet, le caractère discontinu du fonctionnement d'un biofiltre (comprenant une phase de traitement, puis une phase de régénération/lavage) conditionne l'échelle temporelle au cours de laquelle les conditions de fonctionnement sont à calculer et à observer. Les descripteurs et échelles de temps de calcul sont présentés dans le Tableau 2 : Valeurs instantanées ou moyennes pour les phases de traitement ou de lavage.

Dans la suite de cet article, l'évolution dans le temps des descripteurs constitués aux différentes échelles de temps décrites ci-dessus, est ensuite interprétée en vue de se prononcer sur le colmatage. Le paragraphe ci-dessous explicite les calculs des descripteurs.

1.3. Calculs des différents descripteurs de fonctionnement

Les **charges volumiques appliquées** sont calculées à partir de la concentration en DCO mesurée par une sonde, des analyses d'échantillons moyens 24h pour la concentration en MES et le débit unitaire issu du/des débitmètres d'entrée de la biofiltration. Le débit et les concentrations sont moyennés dans la durée du cycle de filtration. Les charges volumiques sont exprimées par durée de cycle de filtration selon l'Équation 1.

$$C_V \left(\frac{kg}{m^3 \cdot cycle} \right) = \frac{\text{Concentration}(g/L) \cdot \text{Durée du cycle de filtration}(h/cycle)}{\text{Volume de matériau filtrant}(m^3)} \quad \text{Équation 1}$$

Cette approche suppose que tous les biofiltres sont alimentés par des flux de pollution égaux. Dans la pratique, lorsque l'alimentation des biofiltres se fait par un canal de distribution central commun, cette répartition peut ne pas être uniforme et le colmatage peut atteindre certaines cellules de biofiltres de l'installation plus que d'autres. Pour cette raison, le colmatage irréversible peut ne pas se matérialiser sur l'ensemble des cellules de biofiltration de l'installation mais sur une cellule en particulier. Cependant, même dans ce cas, l'exploitant procède le plus souvent à l'application des mesures curatives sur l'ensemble des cellules lorsqu'il observe des indices de colmatage sur l'une d'entre elles.

La vitesse ascensionnelle de l'eau, ou **vitesse de Hazen**, est calculée selon l'Équation 2 à partir du débit de pointe et de la surface projetée au miroir. Elle doit rester inférieure à la vitesse de sédimentation des particules garantir le taux de capture des matières en suspension (MES).

$$\text{Vitesse Hazen}(m/h) = \frac{\text{Débit de pointe}(m^3/h)}{\text{Surface projetée}(m^2)} \quad \text{Équation 2}$$

La perte de charge liée au colmatage est une composante de la pression mesurée en pied du biofiltre, elle-même issue du poids de la colonne d'eau et de la résistance à l'écoulement de l'eau (fonction de la porosité qui évolue en fonction de la concentration en solides accumulés provenant des matières en suspension de l'eau usée et de la croissance bactérienne. Il est possible d'estimer la perte de charge liée au

colmatage en soustrayant la perte de charge calculée à partir de la vitesse en eau au moyen d'une relation établie à la mise en service de l'installation. Lorsque ces informations ne sont pas disponibles, il est possible de normaliser la perte de charge par le débit selon l'équation de Kozeny-Karman pour les milieux poreux.

$$\frac{\Delta P}{Q} = h_k \cdot A_S^2 \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \eta \cdot \frac{Z}{S} \text{ avec } \left\{ \begin{array}{l} \Delta P : \text{perte de charge (Pa)} \\ Q : \text{Débit d'écoulement à vide (m}^3 \cdot \text{s}^{-1}) \\ \eta : \text{viscosité dynamique de l'eau (Pa.s)} \\ h_k : \text{constante de Kozeny (-)} \\ A_S : \text{aire spécifique des grains (m}^{-1}) \\ \varepsilon : \text{porosité du milieu} \\ Z : \text{Hauteur du lit filtrant (m)} \\ S : \text{Surface de passage à vide (mm}^2) \end{array} \right. \quad \text{Équation 3}$$

L'Équation 3 permet d'analyser l'évolution de la perte de charge avant et après lavage (au début et à la fin de chaque cycle de filtration). Toutefois, cette méthode peut être biaisée dans certaines situations, en particulier lorsque la porosité initiale varie d'un cycle à un autre (difficulté du retour à la porosité du filtre propre) comme c'est le cas lors de la survenue d'un colmatage irréversible.

Pour s'affranchir de variations induites par l'hydraulique, on privilégie la mesure de la perte de charge à débit constant sur site (par exemple lors de la dernière phase du rinçage), et on détermine la pression de référence pour une période de fonctionnement où le biofiltre n'est pas sujet à colmatage irréversible, par exemple lors de la remise en fonctionnement après des mesures curatives si l'exploitant en utilise. On peut également choisir la plus faible valeur durant une période comme valeur de référence. Ces références sont à vérifier et à réajuster chaque année. Il serait intéressant de connaître la perte de charge initiale du système réalisée à la mise en route de l'installation sans ensemencement.

Le **volume de vide disponible, ou volume des vides**, est estimé à partir de l'Equation 4. Il s'agit d'une mesure de la porosité disponible au début du cycle de filtration (après lavage) exprimée en volume de vides libres pour l'écoulement et pour l'encrassement dû à la rétention des matières en suspension de l'eau à filtrer et du stockage de la biomasse produite (croissance bactérienne). La fraction de vide disponible ou porosité ε est calculable à partir du débit et de la mesure de pression du capteur au début du cycle par résolution de l'Équation 3 par la méthode du gradient réduit (solveur d'Excel). Le volume de vide est calculé selon l'Équation 4 à partir du volume total du lit filtrant et la porosité.

$$\text{Volume de vide} = \varepsilon \cdot V \quad \text{Équation 4}$$

$$\text{avec } \left\{ \begin{array}{l} V : \text{Volume du lit filtrant} \\ \varepsilon : \text{Porosité} = \text{fraction de vide dans le volume total du massif (cf. Équation 3)} \end{array} \right\}$$

Le volume de vide de référence est calculé à partir d'une période sans colmatage ou après un lavage chimique suivi d'une recolonisation du matériau filtrant.

2. Résultats et discussion

L'étude porte sur une des cellules de la filière biofiltration décrite dans le paragraphe 1, traitant un effluent urbain, et avec pour objectif un rejet en eau douce de surface hors zone sensible. L'analyse approfondie de l'évolution des conditions de fonctionnement de ce procédé a été conduite sur la période de 815 jours dans le but de mettre en évidence les périodes d'accumulation et de consolidation de la matière, puis d'en analyser les raisons. La perte de charge initiale (i.e. au démarrage d'un cycle de filtration) et le volume de vide disponible pour le cycle de filtration sont tout d'abord présentés (Figure 3). Puis, les évolutions des charges appliquées en DCO et MES sont analysés (Figure 4). Enfin, une grille d'analyse est proposée pour aider à diagnostiquer et prévoir l'évolution vers le colmatage, et proposer des actions correctives (Tableau 3).

2.1. Analyse de la dynamique de perte de charge pour repérer la dérive vers le colmatage irréversible

La Figure 3 présente l'évolution au cours du temps de la perte de charge initiale de cycle (i.e. après un lavage) normalisée par rapport au débit (cf. 1.3 : Équation 3), ceci afin d'atténuer les variations induites par les différences de débit d'alimentation. La figure est divisée en 5 sections (notées P1 à P5), délimitées par les lavages chimiques à la soude. On observe, qu'après un lavage à la soude et un temps de recolonisation du support par le biofilm, la perte de charge initiale de cycle du biofiltre prend des valeurs de l'ordre de 0,6 mbar/m³/j (cf. losanges rouges sur la Figure 3). Cette valeur est considérée comme la référence du biofiltre « propre » ne comprenant pas d'accumulation de matières résiduelles persistantes après lavage.

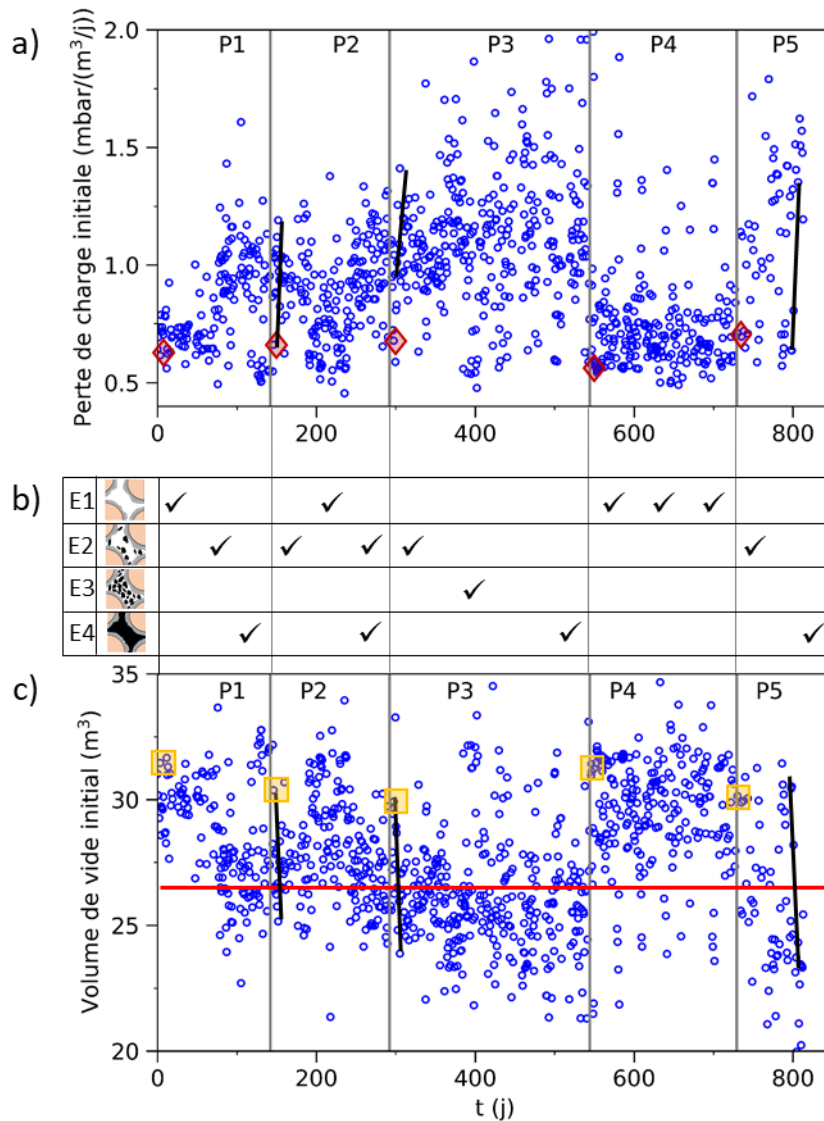


Figure 3 : Evolution temporelle (a) de la perte de charge initiale de cycle ($\text{mbar}/\text{m}^3/\text{j}$), (b) du remplissage de la porosité et (c) du volume de vide (m^3) pour le biofiltre. Les lavages chimiques sont représentés par les barres verticales grises. Les périodes entre deux lavages chimiques sont notées P1 à P5. Le symboles ♦ et □ correspondent respectivement à la perte de charge du filtre propre d'environ $0,6 \text{ mbar}/\text{m}^3/\text{j}$ et au volume de vide du biofiltre propre d'environ 30 m^3 . Les droites noires représentent la variation maximale sous 2 à 4 jours. Les vignettes illustrent les phénomènes d'accumulation de matières solides à l'échelle du pore : E1. Extraction des solides accumulés par les lavages, E2. Accumulation de solides, E3. Amorce de consolidation, E4. Consolidation avérée.

La période P4 présente une perte de charge maintenue constante à $0,7 \pm 0,1 \text{ mbar}/\text{m}^3/\text{j}$ en moyenne (si l'on écarte les 15 cycles de filtration où les pertes de charges sont supérieures à $1 \text{ mbar}/\text{m}^3/\text{j}$). 86% des cycles ont eu une perte de charge initiale inférieure à $0,8 \text{ mbar}/\text{m}^3/\text{j}$. Le volume de vide disponible pour le cycle de filtration a été constant et égal à $30 \pm 2 \text{ m}^3$, valeur considérée dans la suite comme référence d'un fonctionnement sans colmatage, c'est-à-dire pendant lequel les lavages éliminent la totalité des matières

accumulées.

Les quatre autres périodes (P1, P2, P3 et P5) ont été caractérisées par des tendances à la hausse de la perte de charge initiale, avec des valeurs atteignant 1,2 mbar/m³/j, voire même 1,5 mbar/m³/j en fin de période, reflétant une réduction importante du volume du vide disponible pour l'encrassement au début d'un cycle de filtration. Au démarrage de la période P3, la perte de charge initiale était supérieure à 0,9 mbar/m³/j, puis une évolution croissante est observée. Seuls 12% des cycles de la période P3 présentait une perte de charge initiale inférieure à 0,8 mbar/m³/j. Le volume de vide disponible au début de cycle de filtration était d'en moyenne 26 m³ au cours de toute la période, soit bien plus faible que la valeur de référence (30±2 m³). Au démarrage de la périodes P2, la perte de charge initiale était également supérieure à 0,9 mbar/m³/j, mais nous avons ensuite observé une diminution entre t=180 j et 230 j à 0,5-0,6 mbar/m³/j lors d'une dizaine de cycles de filtration, puis une augmentation jusqu'à 1,3 mbar/m³/j (fin de la période P2). Lors de la période P5, la perte de charge initiale a diminué de 0,9 à 0,5-0,6 mbar/m³/j lors de 8 cycles de filtration (t=790 j). Le volume de vide disponible pour l'encrassement au début d'un cycle de filtration a augmenté à 31 m³. Ensuite, les périodes P1 et P5 ont comporté une augmentation continue de la perte initiale des cycles jusqu'à 1,2 et 1,65 mbar/m³/j respectivement. Dans le même temps, les volumes de vide disponible pour l'encrassement au début d'un cycle de filtration ont diminué de 31 m³ à 25 et 22 m³ pour P1 et P5 respectivement.

L'accroissement de la perte de charge a été différent d'une période à une autre, ainsi qu'au sein d'une même période. Il a atteint 0,22 mbar/(m³/j)/cycle pendant 2 jours lors des périodes P2 et P5 et 0,12 mbar/(m³/j)/cycle pendant 4 jours lors de la période P3.

2.2. Interprétation des données : quelle relation avec les charges appliquées ?

Cette partie présente une interprétation des données à la lumière des charges volumiques appliquées représentées (Figure 4), et de leur comparaison aux valeurs conseillées représentées en vert [GONZALEZ VAZQUEZ et al., 2020] et des valeurs de dimensionnement représentées en rouge sur les graphiques.

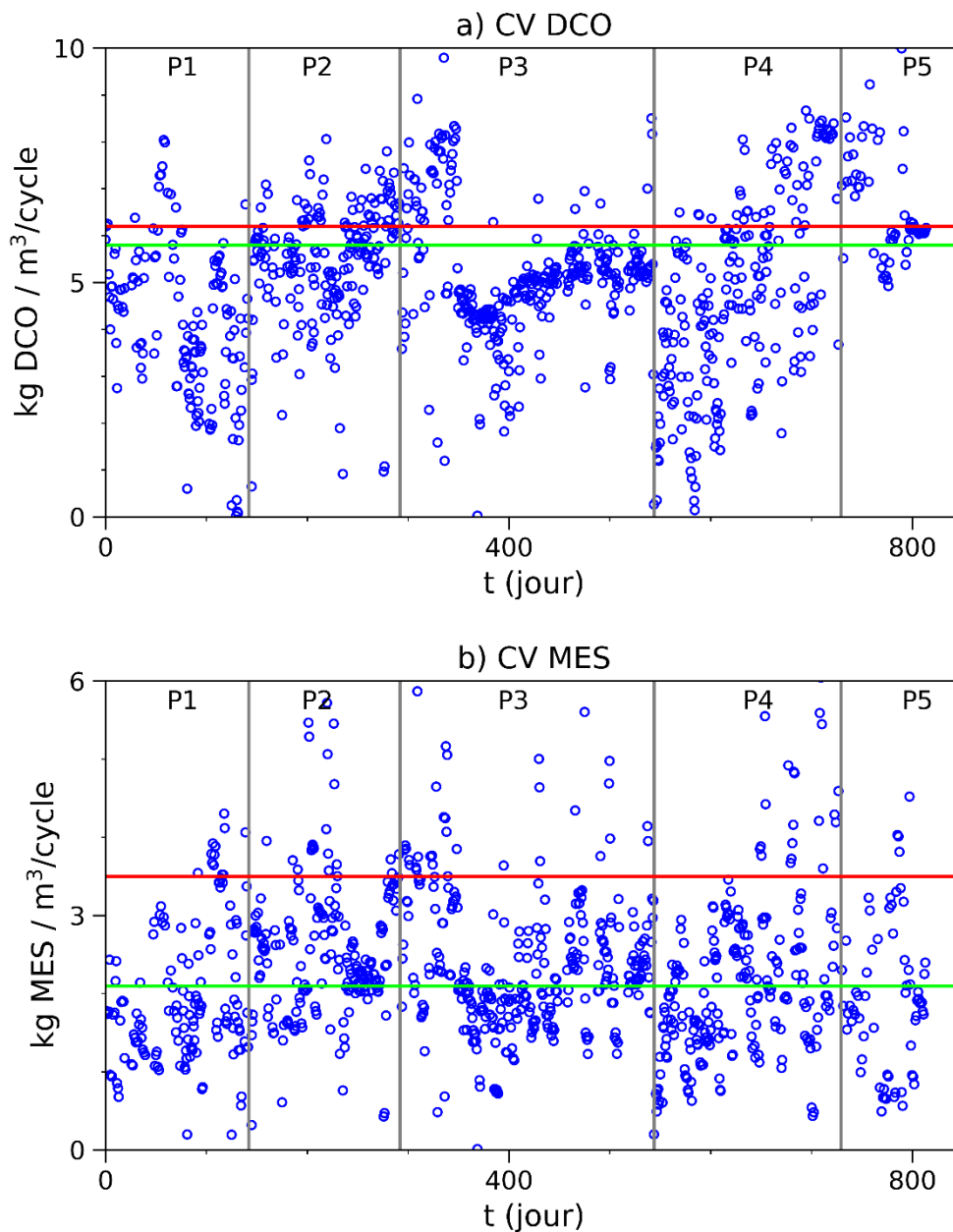


Figure 4 : Evolution temporelle des charges volumiques appliquées en DCO et en MES ($\text{kg}/\text{m}^3/\text{cycle}$). Les lavages chimiques sont représentés par les barres verticales grises. Les périodes entre deux lavages chimiques sont notées P1 à P5. Les droites horizontales indiquent les valeurs de dimensionnement (en rouge) et les valeurs conseillées dans [GONZALEZ VAZQUEZ et al., 2020] (en vert).

La période P4, proche de l'état de référence, est caractérisée par une charge volumique en DCO alternativement supérieure et inférieure au seuil de risque de colmatage. Dans cette période, la perte de charge initiale de cycle et le volume de vide sont relativement constants. Ce fonctionnement atteste d'un lit filtrant fonctionnant sans accumulation de matières solides au sein de sa porosité, et donc démontre des

lavages efficaces. Il est possible que le lavage chimique marquant la fin de la période P4 ait été réalisé préventivement, c'est-à-dire alors que le filtre ne présentait pas de colmatage, ce qui est souvent le cas lorsque l'exploitant détecte un colmatage sur l'une des cellules de biofiltre et procède au lavage chimique de toutes les cellules.

Les charges volumiques appliquées à chaque cycle de filtration sont croissantes sur une partie ou la totalité de chacune des périodes. Les charges en DCO sont jusqu'à 1,5 fois supérieures au seuil à partir desquels le risque de colmatage irréversible est élevé (5,8 kg DCO/m³/cycle) [GONZALEZ VAZQUEZ et al., 2020]. Pour la charge en MES, celle-ci est 2,5 fois plus élevées au seuil de la charge critique en MES (2,1 kg MES/m³/cycle).

Au milieu de la période P2 (t=200 jours), on observe une diminution des charges volumiques appliquées de 6,0 à 3,8 kg DCO/m³/cycle, et de 3,0 à 1,5 kg MES/m³/cycle. Cette baisse s'est accompagnée d'une baisse de la perte de charge initiale de cycle progressive vers sa valeur de référence (de 1 à 0,6 mbar/m³/j) et d'une récupération du volume de vide au début de cycle de filtration à sa valeur de référence (32 m³). Ainsi, le colmatage en place à la moitié de la période P2 s'est résorbé, ce qui suggère qu'un lavage élimine une quantité donnée de matières solides, et que lorsque cette capacité est dépassée, les matières excédentaires restent présentes dans la porosité du lit jusqu'à qu'une baisse des charges appliquées permettant son évacuation progressive.

Lors de la période P3, sur l'intervalle t= 330 à 390 jours, la diminution des charges en DCO (de 8,1 à 1,8 kg DCO/m³/cycle) et en MES (de 4 à 1,2 kg MES/m³/cycle) explique la diminution de la perte de charge initiale de 1,5 à 0,6 mbar/m³/j à t=390 j et l'augmentation du volume de vide de 24 à 31,5 m³ (Figure 3), en seulement une dizaine de lavages. La matière résiduelle n'était pas encore consolidée et a été évacuée par les lavages lorsque les charges appliquées ont diminué.

Au-delà des charges volumiques appliquées, la nature de la matière contenue dans l'eau usée à traiter est un facteur déterminant de l'installation d'un colmatage irréversible. En effet, un effluent riche en DCO soluble biodégradable (i.e. ratio DCO/MES élevé) est susceptible de provoquer un colmatage irréversible du fait d'une génération plus importante de biomasse lors du traitement [GONZALEZ VAZQUEZ et al., 2020]. C'est le cas lors de la période P3 pour lesquelles le ratio DCO/MES a pris des valeurs de 6 (t= 320-380 j) et 9 (t=504-543 j) contre 3,2 habituellement. Ces conditions entraînent une génération de biomasse ayant un pouvoir colmatant plus important que les particules de l'eau usée. Cette biomasse microbienne favorise une consolidation du biofilm, reflétée par une perte de charge élevée pendant toute la période (1,2 mbar/(m³/j)).

Nous avons montré l'importance de réaliser une analyse croisée des paramètres physiques du lit filtrant (perte de charge initiale et volume de vide) et des charges volumiques appliquées par cycle de filtration. Toutefois, les données brutes sont complexes à interpréter seules, et il faut les comparer à une (ou plusieurs) valeur(s) de références pour en déduire l'évolution vers une situation de colmatage irréversible. Il est par exemple possible de détecter le colmatage lorsque l'on a défini des seuils critiques de perte de charge et de volume de vide en lien avec les charges appliquées. Pour ce faire, l'utilisation des unités de temps différentes, mais adaptées, à chaque paramètre est primordiale. Dans le paragraphe suivant, nous proposons un protocole de diagnostic décrivant les différentes étapes d'analyse de données.

2.3. Quelle stratégie pour prévoir le colmatage irréversible ?

L'analyse détaillée du fonctionnement d'un biofiltre s'appuie sur différents descripteurs calculés sur des intervalles de temps différents. Les moyennes sur la durée du cycle de filtration sont calculées pour les charges volumiques ou les concentrations appliquées, tandis que l'information instantanée au début du cycle de filtration est utilisée pour la perte de charge ou le volume de vide (Cf. tableau 2).

Pour détecter l'évolution vers un colmatage irréversible il est nécessaire de vérifier régulièrement la perte de charge initiale de cycle (liée au volume de vide disponible) qui reflète l'accumulation des solides contenus dans le milieu granulaire, c'est-à-dire non évacués par le lavage. Les valeurs sont à comparer avec les valeurs de référence de chaque cellule de biofiltre du site étudié. Le non-retour à l'état de référence pendant plusieurs cycles doit alerter, car il permet de détecter la dérive vers le colmatage. Le Tableau 3 précise les paramètres de diagnostic (et leur hiérarchisation), et propose des causes et des actions correctives pour y remédier.

Le franchissement des seuils de référence de perte de charge signifie que les lavages n'extraient pas tous les solides accumulés dans la porosité et donc que les charges appliquées effectives sont trop fortes. En effet, toutes les périodes analysées (sauf P4), sont caractérisées par des charges volumiques DCO et MES supérieures aux charges maximales préconisées pour obtenir des lavages efficaces et préserver dans le temps le bon fonctionnement des biofiltres. Toutes ces périodes ont conduit à des colmatages irréversibles du fait qu'aucune action n'a été entreprise. A la différence des autres périodes, les cycles de filtration se déroulant à des charges supérieures aux seuils sont très peu nombreux durant la période P4, ils sont alternés avec des cycles à très faibles charges volumiques, ce qui introduit la notion de temps d'application des charges volumiques élevées (état C). Ces seuils ne sont pas des valeurs totalement constantes et fixes du fait de la qualité de la DCO et de l'hétérogénéité du filtre. Il est indispensable de mesurer l'indicateur de perte de charge à débit constant (par exemple lors du rinçage), et de croiser son évolution avec les évolutions des charges appliquées en DCO et en MES pour vérifier le rythme des apports mais également, la nature de ceux-ci qui n'aboutissent pas aux mêmes conséquences de remplissage de la porosité du biofiltre.

On rappelle que lorsque les charges appliquées sont trop élevées, plusieurs causes doivent être étudiées : valeur excessive de dimensionnement, mauvaise gestion du nombre de biofiltres en production, fréquence de lavage trop faible (charges par cycle trop élevée), mauvaise gestion des retours des eaux sales en tête du traitement primaire (le débit des retours peut accroître fortement le débit total traité dans les décanteurs primaires à certaines heures de la journée. L'exploitation du primaire est sans aucun doute un point clef, avec différents points à vérifier que nous discutons dans le zoom ci-après.

Dans le cas de l'installation étudiée, les lavages étaient déclenchés par une horloge. Ce mode de déclenchement a provoqué des surcroûts de charge sur le biofiltre en raison de dysfonctionnement du traitement primaire, conduisant à terme au colmatage irréversible. Pour remédier au problème, on préconise d'asservir le déclenchement des lavages à une consigne de charges volumiques appliquées au cycle de filtration, ou bien sur une consigne de perte de charge haute normalisée par rapport au débit appliquée lors du traitement, mais dont le seuil est inférieur au seuil de sécurité tel qu'il est actuellement pratiqué. D'autres

raisons peuvent conduire aux surcharges, comme décrit dans le ZOOM ci-dessous.

ZOOM : Analyse détaillée du fonctionnement du décanteur primaire dans l'objectif de rechercher les causes du colmatage des biofiltres

Sur l'installation étudiée, nous avons suspecté des départs de boues en provenance du décanteur primaire vers les biofiltres comme raison du colmatage, car nous n'avons observé aucun lien entre les évolutions temporelles des charges volumiques appliquées et les concentrations des eaux brutes, et par ailleurs Les lavages étaient déclenchés sur horloge. Plusieurs pistes de vérification du fonctionnement du traitement primaire sont à envisager comme un dépassement des vitesses maximales de décantation, une mauvaise gestion des boues (concentrations, hauteur du lit, extraction, degré de colmatage des plaques ou nids d'abeille), une mauvaise gestion des retours (dont pertes de MES dues à la présence de nitrates présents dans les eaux sales, absence de filière spécifique pour traiter les eaux de lavages par flottation pour les biofiltres nitrifiants).

La Figure 5 représente les vitesses de pointe à l'échelle de la journée, en différenciant le temps sec (bleu) ou temps de pluie (rouge). On observe que les vitesses de pointe en temps sec ont été supérieures à la vitesse de dimensionnement du décanteur primaire (i.e. 1,7 m/h en temps sec) pendant seulement 2% du temps aux cours de périodes P1, P2, P3 et P5, et 7% du temps en période P4. Toutefois, des charges de MES importantes ont été appliquées à l'entrée de la biofiltration. Celles-ci sont survenues lorsque les temps de séjour hydrauliques dans le décanteur ont été proches de 30 minutes, l'extraction des boues a été insuffisante, et lorsque la concentration en nitrates des eaux de lavages a été supérieure à 5 mg N-NO₃/L (initiation de la nitrification dans les biofiltres carbone entre t=30j et 70 j en août-sept 2014 (P1), et t=350j et 550 j en juillet-août-sept 2015 (P3)). Ces conditions-là n'étaient pas contraignantes lors des dépassements de la vitesse de dimensionnement du décanteur en période P4.

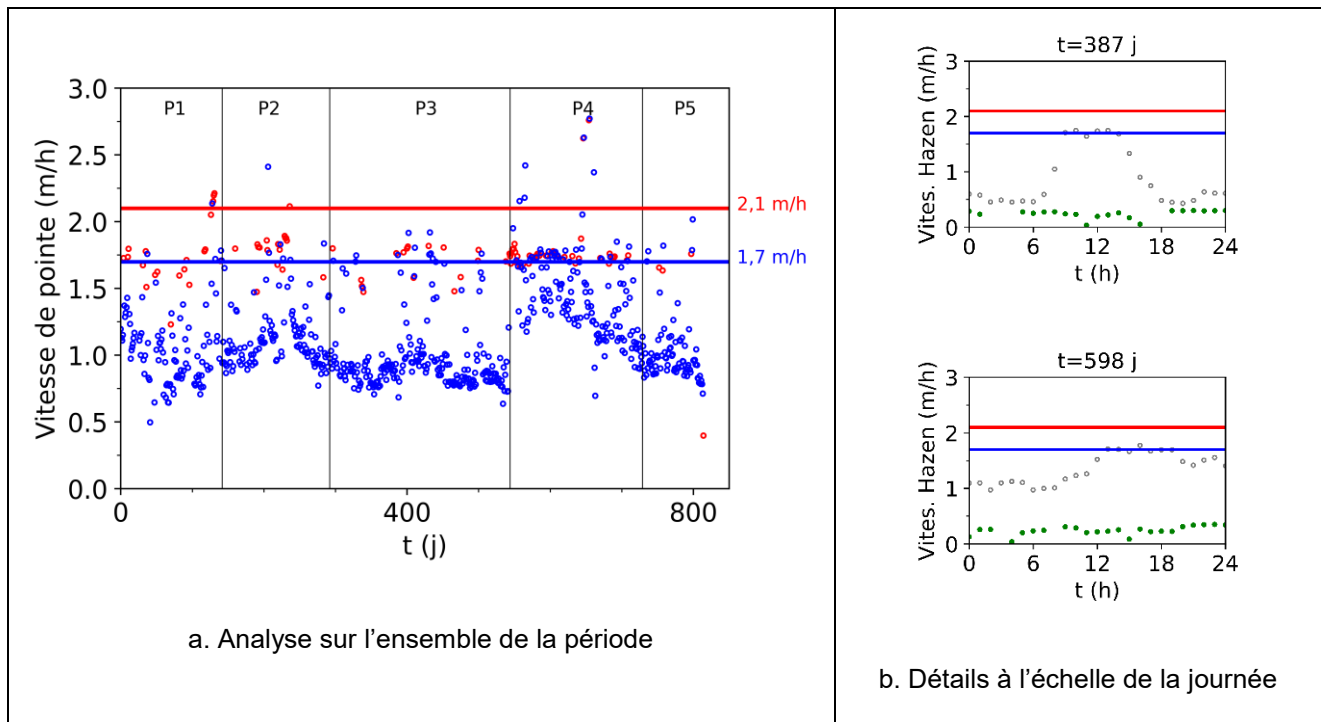


Figure 5 : a. Vitesse de pointe du décanteur primaire pendant 815 jours de fonctionnement comprenant 5 périodes (P1 à P5), avec en bleu les valeurs de temps sec et en rouge les valeurs de temps de pluie. b. Exemple de vitesse horaire sur une période de 24 heures (gris), dont les retours (représentés en vert). Les droites horizontales correspondent aux vitesses de dimensionnement (en bleu le temps sec et en rouge le temps de pluie).

Au jour 387 (période P3), la vitesse horaire a dépassé la vitesse de dimensionnement entre 10:00 et 15:00 (durée 6 heures) du fait des retours des eaux sales à des moments de la journée où le traitement primaire est proche de sa capacité et le niveau de boues est élevé. Les retours contribuent à hauteur de 0,4 m/h à la vitesse de pointe (Figure 5b).

En conclusion, les dépassements de la vitesse de pointe sont à vérifier, en moyenne et à l'échelle de la journée. Il faut également vérifier la bonne gestion des boues, et la composition en nitrates des eaux de lavages notamment en été.

Conclusion

Ce travail présente une méthode de diagnostic permettant de détecter différents degrés d'accumulation de matières solides dans un biofiltre avant d'atteindre le colmatage irréversible. Elle s'appuie sur la mesure de perte de charge initiale de cycle (après lavage) normalisée et met en regard ces observations avec l'occupation du volume de vide (porosité), les charges appliquées et la nature de l'eau à traiter. Le suivi régulier de ce paramètre, et l'écart par rapport à la référence, permet d'avertir l'exploitant d'une situation de risque de colmatage. Ce travail montre également l'intérêt de réaliser l'analyse du fonctionnement d'un biofiltre avec des unités de temps différenciées. Les moyennes sur la durée du cycle de filtration sont à privilégier pour les charges volumiques ou les concentrations appliquées, tandis que l'information

instantanée au début du cycle de filtration est intéressante pour la perte de charge ou le volume de vide.

Outre l'application de la méthode à d'autres installations pour éprouver la méthode, la suite de ce travail consisterait à mieux comprendre les mécanismes se déroulant lors des lavages afin de mieux comprendre et de déterminer les freins à l'élimination des matières accumulées et consolidées.

Eviter le colmatage irréversible par la méthode de diagnostic décrite dans ce travail et grâce aux solutions proposées permettra de minimiser les temps d'arrêt des biofiltres et l'utilisation de produits chimiques, et par conséquent, de réduire les coûts d'exploitation et les impacts environnementaux.

Bibliographie

AZIMI, S., FERREIRA, P., ROCHER, V., PAFFONI, C., GONCALVES, A. (2010): «Vieillesse des unités de biofiltration des eaux usées : bilan après 10 années de fonctionnement.» *Eau, l'Industrie, les Nuisances*.

BARJENBRUCH, M. (2007): «Benchmarking of BAF plants: operational experience on 40 full-scale installations in Germany.» *Water Science and Technology*; 55: 91–98.

BOLLER, M., KOBLER, D., KOCH, G. (1997): «Particle separation, solids budgets and headloss development in different biofilters.» *Water Science and Technology*; 36: 239–247.

CASEY, E. (2007): «Tracer measurements reveal experimental evidence of biofilm consolidation.» *Biotechnology and bioengineering*; 98 : 913–8.

FARABEGOLI, G., CARUCCI, A., GANDOLFO, G., ROLLE, E., VIOTTI, P. (2004): «Experimental study on carbon removal in biological aerated filters.» *Water Science and Technology*; 48: 235–242.

FARABEGOLI, G., CHIAVOLA, A., ROLLE, E. (2009): «The Biological Aerated Filter (BAF) as alternative treatment for domestic sewage. Optimization of plant performance.» *Journal of Hazardous Materials*; 171, 1126–1132.

GONÇALVES, R.F., DE OLIVEIRA, F.F. (1996): «Improving the effluent quality of facultative stabilization ponds by means of submerged aerated biofilters.» *Water Science and Technology*; 33: 145–152.

GONZALEZ VAZQUEZ, B., CHOUBERT, J.M., PAUL, E., CANLER, J.P. (2020): «Comment éviter le colmatage irréversible des installations de biofiltration?» *Techniques Sciences Méthodes* ; 71–86.

LASPIDOU, C.S., RITTMANN, B.E. (2004): «Modeling the development of biofilm density including active bacteria, inert biomass, and extracellular polymeric substances.» *Water research*; 38: 3349–61.

LE BIHAN Y., LESSARD P. (2000): «Monitoring biofilter clogging: biochemical characteristics of the biomass.» *Water Research*; 34(17), 4284–4294.

- LI, T., DONG, W.Y., WANG, H.J., LIN, J.N., OUYANG, F., ZHANG, Q. (2013): «Particles Capturing and Correlation with Head Loss in a Pilot-Scale Biological Aerated Filter.» *Applied Mechanics and Materials*.
- MOORE, R., QUARMBY, J., STEPHENSON, T. (2001): «The effects of media size on the performance of biological aerated filters.» *Water Research*; 35: 2514–2522.
- OSORIO, F., HONTORIA, E., 2006: «Study of the Influence of Backwashing Intensity in Biofilm Systems to Determine the Captured Solids Removal for Modeling Purposes.» *Environmental Engineering Science*; 23: 780–787.
- PAUL, E., OCHOA, J.C., PECHAUD, Y., LIU, Y., LINE, A. (2012): «Effect of shear stress and growth conditions on detachment and physical properties of biofilms.» *Water Research* ; 46 : 5499– 508.
- SHI, X., TAL, G., HANKINS, NP., GITIS, V. (2014): «Fouling and cleaning of ultrafiltration membranes: A review.» *Journal of Water Process Engineering* ; 1 : 121–138.
- URROZ, M. (2007): «*Etude du colmatage d'une installation pilote Biostyr en nitrification tertiaire basée à Saint Fons (69)*.» Rapport de Stage de fin d'études: CEMAGREF Lyon.
- VIOTTI, P., ERAMO, B., BONI, M.R., CARUCCI, A., LECCESE, M., SBAFFONI, S. (2002): «Development and calibration of a mathematical model for the simulation of the biofiltration process.» *Advances in Environmental Research*; 7: 11–33.
- YAN, D., YAN, L., JI-HONG, Z., YONG-DE, L. (2010): «*The Optimization Parameters and Performance of Biological Aerated Filter with Sludge-Glass Ceramic Particles as Biofilter for Dairy Wastewater Treatment.*» 4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, iCBBE 2010 1–4.
- YANG, L., CHOU, L.-S., SHIEH, W.K. (2001): «Biofilter treatment of aquaculture water for reuse applications.» *Water Research*; 35 : 3097–3108.



Les Tableaux

Tableau I : Caractéristiques constructives et opérationnelles des biofiltres étudiés. Données disponibles.

Paramètres de dimensionnement	
Capacité nominale	467 000 équivalents-habitants 257 000 m ³ /j (débit de référence)
Nombre de cellules de biofiltres	14
Surface d'une cellule (m ²)	91,5
Hauteur du massif filtrant (m)	2,85-2,92
Granulométrie matériau (mm)	3,2-3,8
Porosité du lit filtrant propre	0,41
Système d'alimentation des biofiltres	Canal de répartition central
Paramètres de fonctionnement	
Asservissement nombre de cellules de biofiltres en filtration	Débit d'entrée (périodes P1 à P4) Charges appliquées en MES (période P5)
Aération et régulation associée	2 compresseurs (plus 1 de secours) pour les 14 cellules Débit d'air fixe, asservi au débit d'entrée
Asservissement des lavages (dépassement d'un des 3 seuils)	Temps de filtration, Volume d'eau filtré, Perte de charge
Lavages chimiques à la soude	2 par an et par cellule (t=142 j, 292 j, 544 j, 729 j) Les périodes entre deux lavages chimiques à la soude sont notées P1 à P5, et représentés sous forme de barres dans les graphiques des Figures 3, 4 et 5a
Durée d'analyse (données brutes disponibles chaque seconde ou chaque minute selon la variable)	2,2 ans (soit 815 jours) sur les années 2014 à 2016

Tableau II : Descripteurs (et échelles de temps du calcul) pour l'analyse détaillée des conditions de fonctionnement

Intervalle de temps considéré	Phase de traitement	Phase de lavage
Instantané (ou série d'instantanés)	Perte de charge en début de cycle Volume de vide Concentration sortie biofiltration (si sondes disponibles) Vitesse de pointe décanteur primaire Concentration entrée décanteur	Perte de charge Concentrations des eaux de lavages Volume de vide

		P3 : 293-350 j P4 : 713-729 j P5 : 750-755 j		Qualifier l'efficacité des lavages par un échantillonnage (flux MES extrait) Lavage intensif (ex. durée et vitesse en eau et/ou air plus élevées que lavages standards)
E3. Amorce de consolidation 	+60% à +100% pendant plusieurs cycles P1 : 90-110 j P3 : 350-390 j	CV MES > 2,1 P1 : 90-110 j	>3,2 P3 : 385-390 j	Lavage intensif
E4. Consolidation avérée 	> +100% pendant durée importante, et maintenu constant lorsque charges < valeur conseillée P1 : 110-142 j P2 : 280-292 j P3 : 390-544 j P5 : 770-820 j	CV MES > 2,1 P1 : 100-115 j P2 : 280-350 j P5 : 785-792 j	>3,2 P3 : 425-440 j, 500-510 j P5 : 770-820 j	Lavage chimique (ex. soude)