

Dosage de charbon actif en poudre avant un biofiltre nitrifiant à la STEP de Fribourg

Essais pleine échelle pour l'élimination des micropolluants



Février 2020

rédaction: Plateforme «Techniques de traitement des micropolluants» du VSA
M. Horisberger, Triform SA

Une présentation plus détaillée de ces essais et de leurs résultats est disponible dans le [rapport final](#) [1] publié en ligne sur www.micropoll.ch.

Remerciements : Les auteurs tiennent à remercier les différents acteurs ayant pris part à la mise en place et au bon déroulement des essais réalisés, notamment : Roman Aeby, Mario Folly ainsi que les membres du personnel de la STEP de Fribourg, Alain Berset (Triform), Adriana Gonzalez Ospina, Jean-Michel Grenaingaire et Jérôme Albertini, Erwan Lotode (SUEZ).

Source photo: M. Horisberger, Triform SA

Contenu:

- 1. **Introduction** 5
- 2. **La STEP de Fribourg**..... 5
- 3. **But des essais** 7
- 4. **Déroulement des essais** 8
- 5. **Résultats** 10
- 6. **Conclusion** 16
- 7. **Bibliographie** 17

Résumé

La révision de la législation sur la protection des eaux et la planification cantonale fribourgeoise prévoient que la STEP de Fribourg sera équipée d'une étape de traitement des composés traces organiques à l'horizon 2025. Dans ce contexte, la ville de Fribourg a mandaté le bureau d'ingénieurs Triform SA pour une étude préliminaire. Celle-ci a montré que l'ozonation et le dosage de charbon actif en poudre (CAP) avant les biofiltres existants sont des options intéressantes, cette dernière principalement en raison de l'espace limité disponible. Cependant, ce procédé de dosage de CAP n'ayant pas encore été construit ou piloté, un essai à l'échelle industrielle était nécessaire. Cet essai a été réalisé à la STEP de Fribourg de novembre 2016 à juillet 2017.

L'objectif était, d'une part, d'étudier si les ouvrages existants pouvaient servir de réacteur de contact et de séparation pour le dosage de CAP, et, d'autre part, de déterminer l'efficacité de traitement et les paramètres opérationnels. L'un des huit biofiltres existants a été équipé d'un système de dosage automatique de CAP et de coagulant.

L'abattement des 12 substances sur le « biofiltre test » se situait entre 75% et 83% avec un dosage de 10 gCAP/m³ (1,4 gCAP/gCOD) et entre 82% et 91% avec un dosage de 15 gCAP/m³ (2,2 gCAP/gCOD). Ces dosages permettent d'atteindre le taux d'épuration prescrit par la loi, à savoir 80% par rapport aux eaux usées brutes.

Au cours des essais, aucune perturbation de la nitrification par le CAP n'a été constatée. La valeur limite pour les matières en suspension (MES) a également été respectée, bien que la charge de MES+CAP ait dépassé les valeurs de dimensionnement des biofiltres. Avec un dosage plus élevé, la turbidité et les valeurs MES en sortie ont eu tendance à augmenter. Aucune accumulation indésirable de charbon n'a été observée.

Dans le cadre d'un projet VSA en coopération avec la Haute école technique du nord-ouest de la Suisse (FHNW), des analyses thermogravimétriques ont été effectuées pour déterminer la part de CAP dans les concentrations de MES en sortie. Les pertes de CAP étaient de 5 à 12% de la quantité dosée. Ces valeurs sont supérieures à celles de procédés comparables, c'est pourquoi une étape de filtration finale est nécessaire pour minimiser les pertes de CAP et garantir une protection adéquate des eaux.

L'utilisation de biofiltres comme réacteurs de contact en combinaison avec une étape finale de filtration semble appropriée pour éliminer les micropolluants à l'aide de CAP à la STEP de Fribourg.

Est-il possible d'éliminer des micropolluants en dosant du charbon actif en poudre sur un biofiltre nitrifiant existant et économiser de la place, sans perturber le biofiltre ? Cette question ainsi que d'autres seront abordées dans le présent rapport dans le cadre des essais à pleine échelle à la STEP de Fribourg.

1. Introduction

Suite à la révision de la LEaux et de l'OEaux et selon la planification cantonale fribourgeoise [2], la STEP de Fribourg devra être équipée d'un traitement des micropolluants à l'horizon 2025. Le taux d'épuration des micropolluants légalement requis est de 80% entre l'entrée et la sortie de la STEP.

Dans ce contexte, la Ville de Fribourg a mandaté le bureau Triform SA pour une étude préliminaire. Au cours de l'étude de variante, deux options se sont révélées pertinentes pour le site : l'ozonation ou le dosage de charbon actif en poudre (CAP) avant les biofiltres nitrifiants existants. Cette seconde option permet d'utiliser des installations existantes, ce qui est un avantage au vu des conditions d'espace restreint à la STEP de Fribourg, et permettrait d'envisager le raccord futur de bassins versants avec des eaux industrielles potentiellement problématique pour l'ozonation.

Plusieurs projets de recherches ont été initiés pour évaluer le dosage direct de CAP dans la biologie (exemple STEP de Wetzikon [3]) ou sur des filtres à sable existants (exemple STEP de Schönau [4]), avec des résultats prometteurs. Ces techniques permettent d'économiser de l'espace et de diminuer les coûts d'investissements, puisque les infrastructures existantes sont utilisées. Jusqu'à ce jour, l'influence du CAP sur les biofiltres nitrifiants n'a toutefois pas été étudiée. C'est pourquoi la décision a été prise de réaliser des essais, qui ont pris place à la STEP de Fribourg de novembre 2016 à juillet 2017. Ils ont permis de valider la faisabilité de cette variante de traitement par CAP et sont décrits dans le présent rapport.

Le maître d'ouvrage, à la suite de l'étude de variante complète, s'est finalement orienté sur la variante de traitement par ozonation. L'avant-projet devrait être réalisé courant 2020.

2. La STEP de Fribourg

La STEP de Fribourg traite les eaux usées domestiques de la commune de Fribourg et de quelques communes avoisinantes. Elle reçoit également les eaux industrielles d'une usine

de transformation du lait (Crema SA) et est dimensionnée à 182'000 EH, pour un débit temps sec Q_{TS} de 45'000 m³/j.

La chaîne de traitement biologique est composée de bassins à boues activées dimensionnés pour le traitement du carbone, suivis d'une étape de décantation finale puis de biofiltres nitrifiants (Fig. 1). Les eaux de sortie sont recirculées par temps sec jusqu'à hauteur de 300% de manière à maintenir un débit d'alimentation constant sur l'étape biologique et d'effectuer une dénitrification partielle. Pour les analyses de routine à la STEP, des prélèvements sont réalisés sur plusieurs stations (numérotation Fig. 1).

Durant la période des essais, les concentrations en COD et MES en sortie de STEP étaient toutes deux d'environ 9 mg/l. En entrée des biofiltres nitrifiants, il y avait environ 14 mg/l de MES. Le débit journalier moyen était de 25'400 m³/j et le $Q_{TS,VSA}$ de 18'800 m³/j (Q_{max} de 85'400 m³/j). Le Tab. 1 contient des informations sur la capacité et le fonctionnement des biofiltres.

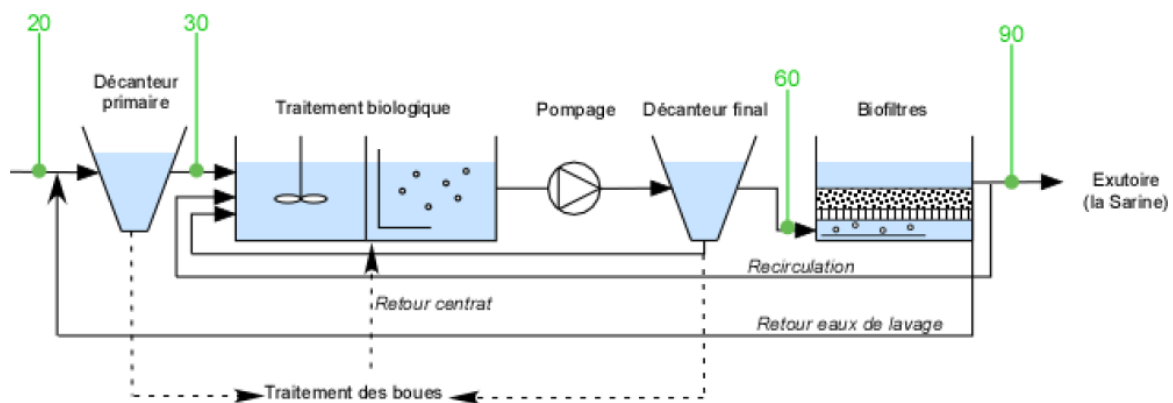


Fig. 1: Filière eau de la STEP de Fribourg. Stations de prélèvements ; 20 : Eaux brutes totales après pré-traitements, 30 : Sortie du décanteur primaire (entrée boues activées), 60 : sortie du décanteur secondaire, canal d'entrée des biofiltres pour l'étape de nitrification, 90 : Canal de rejet à la Sarine en sortie de nitrification, après déduction des eaux de recirculation

Dimensions Biofor®	Nombre d'unité : 8
Charges de dimensionnement	DCO : 2.08 kg/m ³ /j soit 270 kg/j/Biofor® N-NH ₄ ⁺ : 0.65 kg/m ³ /j soit 85 kg/j/Biofor® MES : 0.69 kg/m ³ /j soit 90 kg/j/Biofor® Capacité de rétention en MES : 2.7 kg/m ³ /j soit 351 kg/cycle/Biofor®
Média filtrant	Type : Biolite™ L 2.7 (concassée), granulométrie 2.5-2.9 mm Hauteur du matériau : 2.3m
Vitesse ascensionnelle	Vitesse minimum : 3 m/h Temps sec : 4 m/h Temps de pluie : 9.8 m/h

Tab. 1: Capacité et fonctionnement des biofiltres de type Biofor® à la STEP de Fribourg

La STEP de Fribourg est équipée de 8 cellules à flux ascendant identiques réparties sur deux chaînes de traitement. Durant la période des essais, le nombre de filtres en activité a été asservi au débit d'entrée de la STEP avec un maximum de 6 filtres par temps sec. Le premier biofiltre de la chaîne n°2 a été sélectionné comme cellule test pour le dosage de charbon. La suite de l'article s'y rapporte sous le nom de « biofiltre test ».

3. But des essais

Les objectifs des essais étaient les suivants :

- Simuler le dosage de CAP dans les bassins à boues activées et mesurer l'effet de filtration du CAP par un biofiltre de type Biofor® ;
- Doser du CAP en entrée du « biofiltre test », mesurer l'effet de rétention du CAP par le biofiltre et le rendement d'élimination des micropolluants ;
- Vérifier si la nitrification n'est pas perturbée ;
- Surveiller l'évolution des pertes de charge dans le « biofiltre test » en relation avec la présence de CAP ;
- Vérifier le bon fonctionnement du « biofiltre test » en présence de CAP (nitrification, évolution des pertes de charge, processus de lavage).

4. Déroulement des essais

PLANIFICATION

Des campagnes de dosage et de prélèvements pour les analyses des micropolluants à 0, 1.5, 10 et 15 mgCAP/l ont été réalisées (Tab. 2). Ces dosages correspondent en moyenne à 0, 0.2, 1.4 et 2.2 gCAP/gCOD. Ces valeurs se trouvent dans le même ordre de grandeur que celles trouvées dans de précédentes études [5].

Phase	Objectifs	Conditions	Durée
Essais en laboratoire	Sélection du charbon actif		1 mois
Equipement, programmation et essais de fonctionnement	Adaptation du biofiltre test aux conditions de fonctionnement standard (variation de débit et de vitesse)		2 mois
Phase 0	Evaluation de l'état initial	Sans dosage	1 mois
Phase 1	Simulation du dosage en biologie et évaluation de l'effet de filtration du biofiltre	Dosage 1.5 gCAP/m ³	1 mois
Tests divers	Effet de la coagulation, asservissement aux doses spécifiques (gCAP/gCOD sur la base de l'absorbance UV)	Dosage 1.5 gCAP/m ³ Dosage FeCl ₃	3 mois
Phase 2	Evaluation de la rétention du charbon et des taux d'élimination des micropolluants	Dosage 15 gCAP/m ³	1 mois
Phase 3	Evaluation de la rétention du charbon et des taux d'élimination des micropolluants	Dosage 10 gCAP/m ³	1 mois
Mesures additionnelles	Evaluation de la part de charbon dans les MES	Dosage de CAP variable, avec ou sans coagulant	1 mois

Tab. 2: Calendrier des essais

SELECTION DU CHARBON

La sélection de charbon actif en poudre a été réalisée avec une série de jar-tests en batch, évaluant la capacité d'adsorption de trois charbons actifs en poudre différents en mesurant en parallèle la réduction de l'absorbance UV à 254 nm et l'élimination des micropolluants. Le CAP SAE Super de Norit a été choisi grâce à sa performance et pour la large base

comparative disponible en raison de sa fréquente utilisation pour le traitement des micropolluants dans les STEP.

INSTALLATIONS

Un des huit biofiltres de la STEP de Fribourg a été équipé pour permettre le dosage automatique de charbon et de coagulant (chlorure ferrique FeCl_3). Une installation mobile de dosage de CAP a été utilisée lors de ces essais. Il s'agit d'un container comprenant un réservoir de CAP d'environ 1 m^3 (capacité 450 kg), une balance et une installation de mouillage et d'entraînement du CAP (Fig. 2). Un dosage de chlorure ferrique a également été mis en place. L'injection du charbon et du FeCl_3 se fait directement à l'entrée de la cellule « biofiltre test ».



Fig. 2: Installation de dosage du CAP

ANALYSES

Le suivi de l'efficacité du système a été réalisé à l'aide d'analyses en laboratoire des paramètres standards et de 42 micropolluants incluant les 12 composés traces à mesurer selon l'ordonnance du DETEC [6]. Les prélèvements ont été réalisés avant la décantation primaire (20), puis en entrée (n°61) et sortie (n°91) du « biofiltre test ». L'analyse des micropolluants sur des échantillons composites de 48h a été effectuée dans les laboratoires

du Pôle de Compétence pour l'Analyse des Micropolluants (PCAM) de la Direction générale de l'environnement (DGE) du canton de Vaud.

De plus, certains paramètres dont l'absorbance UV à 254 nm en entrée et sortie du « biofiltre test » et la turbidité en sortie ont été mesurées « online » de façon continue. La mesure UV₂₅₄ avait pour objectif de corréler l'élimination des micropolluants à l'abattement de la matière organique et de pouvoir réaliser un suivi des performances en temps réel [7]. La mesure de la turbidité a été utilisée pour détecter les pertes de MES et de charbon.

La fonction d'un biofiltre nitrifiant n'est pas la rétention de MES. Celle-ci est donc généralement moins bonne que celle d'un filtre à sable, conçu dans ce but. Pour cette raison, il a été jugé opportun d'examiner la part de CAP dans les MES en sortie du biofiltre à l'aide d'une analyse thermogravimétrique [8] dans le cadre d'un projet de la plateforme du VSA. Ces analyses ont été réalisées par la Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW). Les eaux usées ont été échantillonnées pendant 24 heures dans diverses conditions de fonctionnement.

5. Résultats

ELIMINATION DES MICROPOLLUANTS

Lors de la campagne à l'état initial, des abattements moyens de 17% et 4% ont été mesurés sur les boues activées et le « biofiltre test » respectivement. Des abattements entre 75% et 83% ont été mesurés sur le « biofiltre test » pour un dosage de 10 mg/l (1.4 gCAP/gCOD, Tab. 3) et entre 82% et 91% pour un dosage de 15 mg/l (2.2 gCAP/gCOD, Tab. 3). Ces dosages permettent donc d'atteindre le taux d'épuration de 80% entre l'entrée et la sortie de la STEP exigé par l'OEaux (Fig. 3).

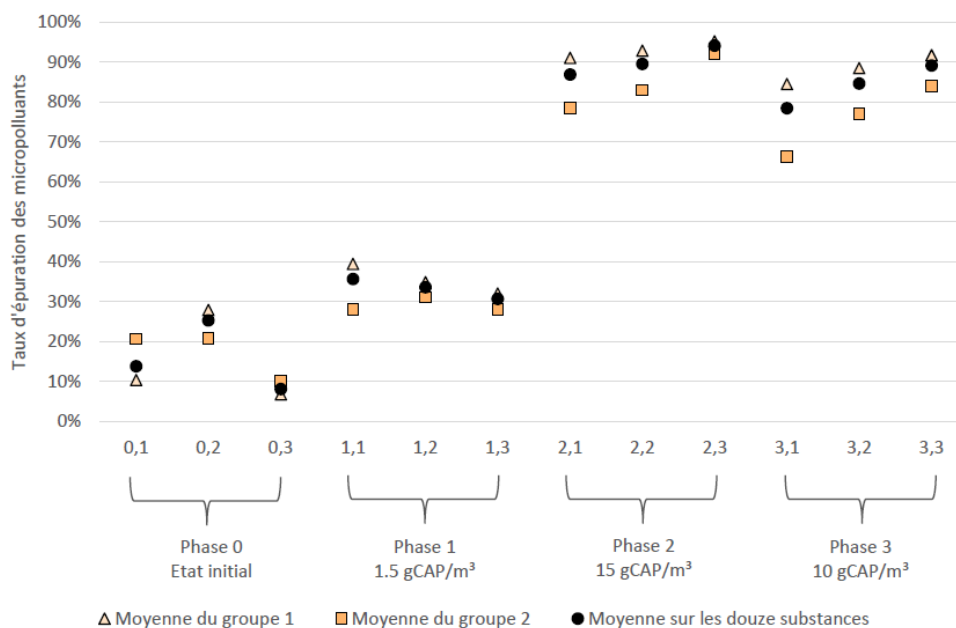


Fig. 3: Taux d'épuration globale STEP + Biofor®test (20-91) - Phases 0 à 3 (3 mesures par phase)

Lors des phases 2 et 3, une augmentation des taux d'abattement en micropolluants a été notée au cours d'une même phase (Fig. 3). Plusieurs pistes sont possibles pour expliquer ce phénomène :

- Influence de la recirculation d'une partie du CAP via la recirculation des eaux de sortie du « biofiltre test » vers le traitement biologique
- Influence de la recirculation d'une partie du CAP via la recirculation des eaux boueuses de lavage vers la décantation primaire
- Stabilisation du procédé au niveau du « biofiltre test »

L'influence de ces différents paramètres n'a pas été explorée plus en détail lors de ces essais. Il est possible que les dosages en g/m³ soient différents en exploitation pleine échelle sous différentes conditions. De même, les valeurs de dosage mentionnées se rapportent à l'entrée du biofiltre étudié et ne peuvent pas être directement transférées à d'autres installations en raison de la disposition du test (pilote en flux partiel et fonctionnement avec une recirculation interne élevée).

Toutefois, les dosages appliqués, rapportés à des gCAP/gCOD (Tab. 3), sont similaires à ceux observés dans d'autres procédés de traitement à charbon actif et confirment la compétitivité du procédé pour l'atteinte des 80% d'élimination exigés par l'OEaux.

N° de campagne	Dosage [gCAP/m ³]	COD Entrée Biofor® test (61) [mg/L]	Dosage [gCAP/gCOD]	Taux d'épuration MP moyen [%]
0.1	0	8.0	0.0	5%
0.2	0	6.3	0.0	4%
0.3	0	8.3	0.0	3%
1.1	1.5	9.6	0.2	25%
1.2	1.5	8.4	0.2	24%
1.3	1.5	8.3	0.2	26%
2.1	15	7.4	2.0	82%
2.2	15	6.2	2.4	85%
2.3	15	7.4	2.0	91%
3.1	10	7.5	1.3	75%
3.2	10	7.6	1.3	82%
3.3	10	6.3	1.6	83%

Tab. 3 : Dosage effectif et dosage en gCAP/gCOD avec taux d'épuration (moyenne des 12 composés traces à mesurer selon l'ordonnance du DETEC)

NITRIFICATION

Les observations réalisées au cours des essais ont mis à jour une problématique de gestion des retours de déshydratation des boues, induisant un dépassement des charges de dimensionnement des Biofors. Afin d'évaluer de manière neutre l'influence du dosage de charbon actif sur la nitrification dans les biofiltres, il s'agit de considérer les jours où les charges de dimensionnement n'ont pas été dépassées.

On constate que les exigences en termes de nitrification ont systématiquement été respectées lorsque les charges d'entrée ne dépassaient pas la charge de dimensionnement et ce même lors du dosage de charbon actif (Fig. 4 et Fig. 5). Seul l'échantillon 2.3 présentait une nitrification insuffisante pour une charge d'entrée relativement faible. Ce résultat n'a pas pu être expliqué mais reste cependant une exception.

La température était entre 13 et 16 °C pendant les phases 0 à 2, et entre 20 et 23°C en phase 3.

En conditions normales de charge ammoniacale, la nitrification n'est pas perturbée par la présence de charbon actif dans le « biofiltre test ».

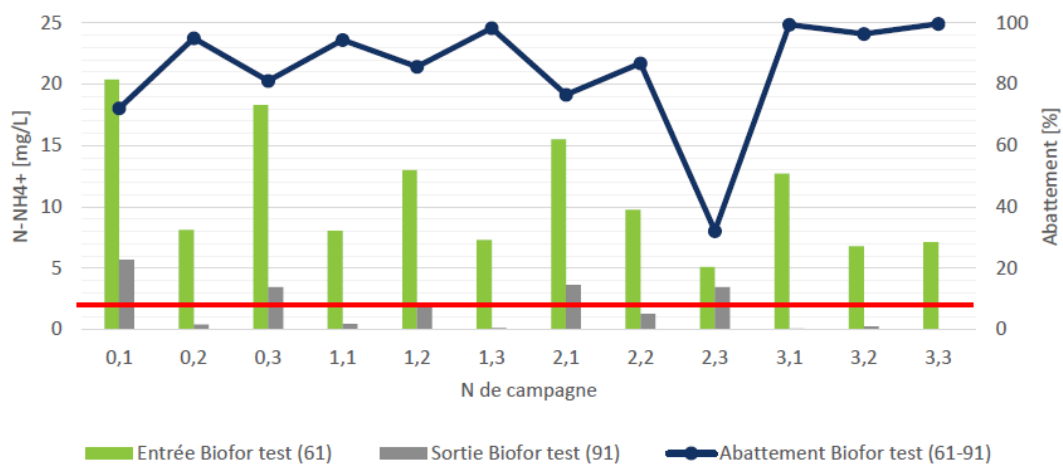


Fig. 4: Concentrations et abattement en $N-NH_4^+$ sur le « biofiltre test » lors des campagnes d'analyse MP, ligne rouge = exigence de rejet

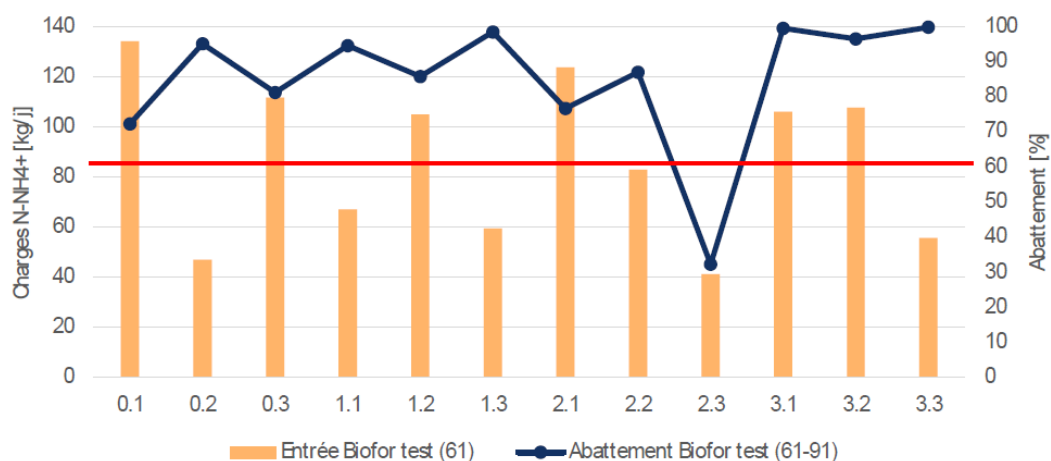


Fig. 5: Charges en $N-NH_4^+$ à l'entrée du Biofor®test par campagne d'analyse MP, ligne rouge = charge de dimensionnement

CARBONE ORGANIQUE DISSOUS

L'abattement en COD sur le « biofiltre test » se situait entre 23 et 35% en fonction du dosage de CAP de 10 ou 15 mg/l (Fig. 6). Sans CAP, le « biofiltre test » montrait un abattement en COD d'environ 6-10%.

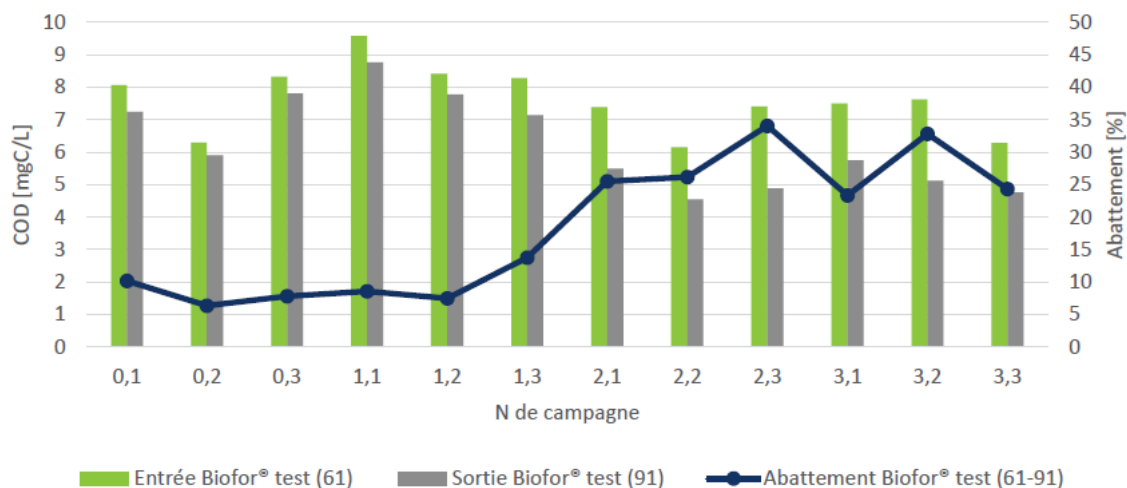


Fig. 6: Concentrations et abattement en COD sur le « biofiltre test » (entrée 61 et sortie 91 « biofiltre test ») par campagne d'analyse MP

MATIÈRES EN SUSPENSION

La norme de rejet en MES, fixée à 15 mg/l, n'a pas été dépassée, bien qu'une charge totale MES+CAP supérieure aux valeurs de dimensionnement ait été appliquée (Fig. 7). Une tendance à l'augmentation de la turbidité et des MES en sortie a toutefois été notée lors des périodes de dosage, bien que les amplitudes restent inférieures à certaines variations observées en dehors des périodes de dosage.

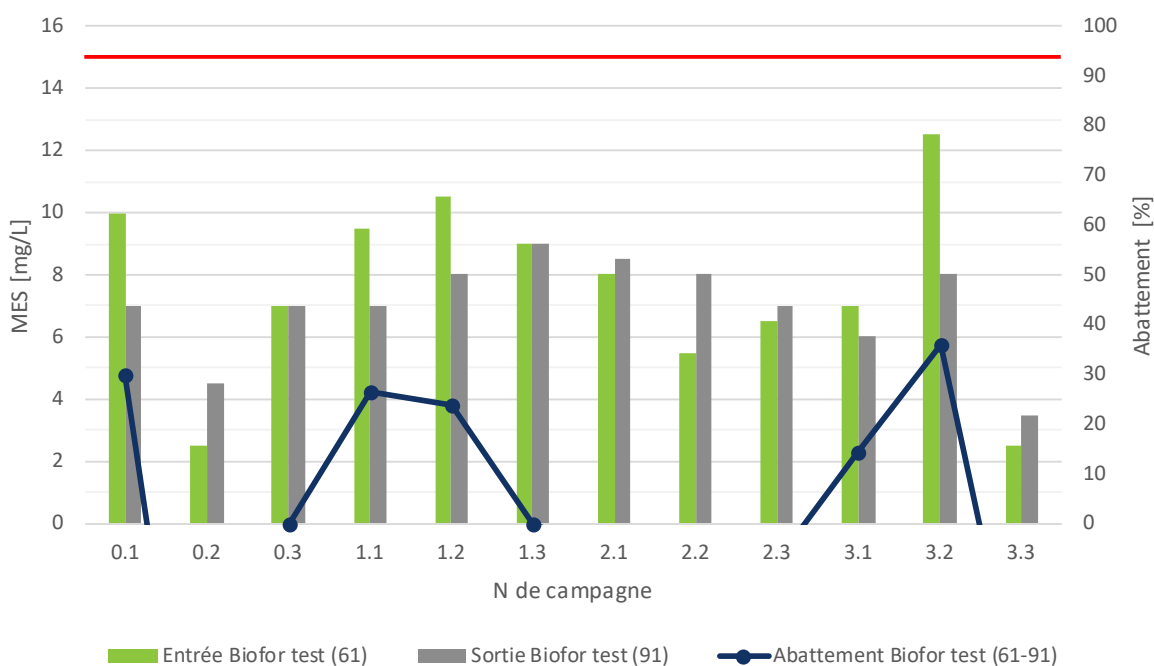


Fig. 7: Concentrations et abattement en MES sur le « biofiltre test » (61 et 91) par campagne d'analyse MP, ligne rouge = exigence de rejet

Durant les essais, les intervalles de lavage du « biofiltre test » n'ont pas dû être adaptés, et aucune accumulation indésirable de charbon n'a été constatée. Les pressions sous-planchers sont restées stables et dans l'ordre de grandeur observé en opération normale.

COAGULANT ET FLOCULANT

Des essais de dosage de FeCl_3 ont été réalisés lors des dosages de CAP plus élevés. L'effet escompté (c.à.d. une meilleure rétention du charbon par le filtre) n'a pas été observé. Une légère coloration de l'eau par le chlorure ferrique a même été constatée. A noter que le dosage d'un floculant n'a pas été envisagé puisque les biofiltres de type Biofor® sont très réactifs à ce genre d'additif et qu'il en découle fréquemment des colmatages.

PERTES DE CAP

Si les valeurs des sondes de turbidité et de MES ainsi que des photos des filtres indiquaient qu'une part du CAP se retrouve dans les MES en sortie du « biofiltre test », elles ne permettaient pas de la quantifier.

Afin de quantifier la part de CAP dans les MES en sortie de STEP, des analyses thermogravimétriques ont été réalisées. Les résultats sont reportés au Tab. 4. Le 8e échantillon a été prélevé durant un événement exceptionnel et non représentatif du fonctionnement normal : une vitesse moyenne de filtration de 16.3 m/h a été observée alors qu'elle aurait dû être de 10 m/h maximum par temps de pluie. Cet échantillon n'a donc pas été considéré dans l'analyse des résultats.

En moyenne, le charbon actif représentait $17 \pm 2\%$ des MES en sortie du « biofiltre test ». La fraction de charbon perdue en sortie par rapport au charbon dosé était de $9 \pm 3\%$. Le rapport CAP/MES ne semblait pas être significativement influencé par la hauteur du dosage (10 mg/l et 15 mg/l ni par les vitesses de filtration. Une relation linéaire entre les concentrations en charbon actif et en MES peut donc être supposée dans la gamme des vitesses de filtration habituelle (3 à 10 m/h).

Selon le rapport final du projet du VSA [9], les pertes de CAP avec le biofiltre nitrifiant sont plus élevées en comparaison avec les autres procédés de traitement des micropolluants par charbon actif. Une étape de filtration finale supplémentaire sera nécessaire pour ce procédé, afin de minimiser la perte de CAP dans le cadre d'une protection efficace des eaux [10].

N° d'échantillon	Vitesse de filtration [m/h]	Dosage CAP [g/m ³]	MES [mg/l]	Fraction de CAP dans MES [%]	Concentration en CAP [mg/l]	Fraction CAP perdu en sortie, CAP dosé [%]
T.1	7.4	10	5.5	19 ± 2	1.1 ± 0.1	10.6
T.2	6.1	10	3.5	16 ± 1	0.6 ± 0.1	5.5
T.3	6.2	10	7.5	16 ± 1	1.2 ± 0.1	12.3
T.4	7.3	10	6.5	18 ± 2	1.2 ± 0.2	11.6
T.5	6.1	15	8	15 ± 1	1.2 ± 0.1	8.1
T.6	6.5	15	6.5	14 ± 3	0.9 ± 0.2	5.9
T.7	7.0	15	9	19 ± 1	1.7 ± 0.1	11.1

Tab. 4: Résultats des analyses thermogravimétriques

6. Conclusion

Les dosages de 10 et 15 mg/l (1.4 et 2.2 gCAP/gCOD) permettent d'atteindre un taux d'épuration de 80% entre l'entrée et la sortie de la STEP exigé par l'OEaux. Les effets de recirculation du CAP et des eaux traitées ainsi que la stabilisation du procédé au niveau des Biofor® n'ont toutefois pas pu être complètement documentés, au vu de la durée des essais.

Au cours des essais, aucune perturbation de la nitrification n'a été observée en lien avec le dosage de charbon. De même, les normes de rejet en MES n'ont pas été dépassées, bien qu'une charge totale MES+CAP supérieure aux valeurs de dimensionnement ait été appliquée.

Les analyses thermogravimétriques indiquent une part d'environ 17% de charbon dans les MES et une perte de CAP de 5 - 12% (en moyenne 9%). Les pertes sont plus élevées qu'avec les autres procédés de traitement au charbon actif étudiés dans le projet du VSA [9]. Une étape de filtration finale avant le rejet à l'exutoire s'avère donc nécessaire.

En conclusion, l'utilisation des biofiltres nitrifiants de type Biofor® comme réacteurs de contact pour un procédé de traitement des micropolluants avec charbon actif en poudre en combinaison avec une étape de filtration finale semble être adéquat dans le contexte de la STEP de Fribourg.

7. Bibliographie

- [1] Horisberger et al., «Essais pleine échelle - Dosage de charbon actif en poudre sur une cellule Biofor(R) - nitrification. STEP de Fribourg. Rapport final.,» Ville de Fribourg. Download www.micropoll.ch., 2018.
- [2] Canton de Fribourg SEn, «Elimination des micropolluants dans les stations d'épuration fribourgeoises. Planification Cantonale.,» mai 2017.
- [3] Frank, K. et al., «PAK im Belebtschlammbecken - Elimination von Mikroverunreinigungen in der ARA mit Pulveraktivkohle im Belebtschlammbecken,» UMTEC, HSR, download www.micropoll.ch, 2015.
- [4] Rössler, A.; Metzger, S., «Untersuchungen zur Spurenstoffelimination mittels simultaner Pulveraktivkohledosierung auf der ARA Schönau - Abschlussbericht.,» Gewässerschutzverband der Region Zugersee-Küssnachersee-Ägerisee, download www.micropoll.ch, Cham, 2015.
- [5] DWA Arbeitsgruppe KA 8.6, «Aktivkohleeinsatz auf kommunalen Kläranlagen zur Spurenstoffelimination - Verfahrensvarianten, Reinigungsleistung und betriebliche Aspekte,» *DWA Themenband T1/2019*, 2019.
- [6] UVEK, «Verordnung des UVEK zur Überprüfung des Reinigungseffekts von Massnahmen zur Elimination von organischen Spurenstoffen bei ARA,» UVEK, Bern, 2016.
- [7] VSA-Plattform "Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen", «Konzepte zur Überwachung der Reinigungsleistung von weitergehenden Verfahren zur Spurenstoffelimination,» www.micropoll.ch/dokumente/faktenblaetter, Dübendorf, 2017.
- [8] Kranstöver, T.; Plattner, J.; Wintgens, T., «Quantitative detection of powdered activated carbon in wastewater treatment plant effluent by thermogravimetric analysis (TGA).,» *Water Research*, Bd. 101, pp. 510-518, 2016.

- [9] Kranstöver, T. et al., «Aktivkohle-Schlupf aus Reinigungsstufen zur Elimination von Mikroverunreinigungen,» VSA-Plattform "Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen" www.micropoll.ch, 2019.
- [10] VSA-Plattform "Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen", «Aktueller Stand Beurteilung Aktivkohle-Rückhalt,» www.micropoll.ch, Dübendorf, 2019.