

# CAG en lit fluidisé :

## Évaluation du procédé à la STEP de Delémont et environs



**Client :**

VSA Plateforme Techniques de Traitement des Micropolluants  
c/o Eawag, Überlandstrasse 133  
8600 Dübendorf

**Partenaire du projet<sup>2</sup> :**

SEDE, Syndicat pour l'assainissement des eaux de Delémont et environs  
Bois du Treuil 4, 2805 Soyhières

**Réalisation<sup>1</sup> :**

Haute école spécialisée du nord-ouest de la Suisse<sup>1</sup> (FHNW)  
Hochschule für Life Sciences  
Hofackerstrasse 30  
4132 Muttenz

**Partenaire du projet<sup>3</sup> :**

Eawag  
Überlandstrasse 133  
8600 Dübendorf

**Auteurs :** Luca Loreggian<sup>1</sup>, Bartosz Kawecki<sup>1</sup>, Michael Thomann<sup>1</sup>, Nora Corvini<sup>1</sup>, Benjamin Gyax<sup>1</sup>, Michael Pulfer<sup>1</sup>, Caroline Baillat<sup>2</sup>, Pierre-Michel Seuret<sup>2</sup>, Marc Böhler<sup>3</sup>

Muttenz, le 18 mars 2026

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Matériel et méthodes .....</b>	<b>7</b>
2.1	STEP de Delémont et environs .....	7
2.2	Échantillonnage des eaux usées.....	10
2.3	Mesure des micropolluants organiques (MPO) .....	11
2.4	Mesure de la perte de $\mu$ CAG .....	12
2.5	Mesure des paramètres globaux.....	12
<b>3</b>	<b>Résultats et discussion .....</b>	<b>13</b>
3.1	Paramètres standard .....	13
3.2	Débit d'entrée à la station d'épuration de Delémont .....	15
3.3	Comportement du lit fluidisé.....	15
3.4	Concentrations de micropolluants .....	17
3.5	Élimination des micropolluants.....	17
3.6	Élimination des micropolluants à différents taux d'injection de $\mu$ CAG.....	20
3.7	Élimination des micropolluants pendant les épisodes pluvieux .....	22
3.8	Perte de charbon actif.....	26
3.9	Concentrations de diclofénac dans les effluents .....	29
<b>4</b>	<b>Conclusions .....</b>	<b>30</b>
<b>5</b>	<b>Références .....</b>	<b>32</b>

## Résumé

Ce rapport évalue les performances à grande échelle du procédé Carboplus (CAG en lit fluidisé) pour l'élimination des micropolluants à la station d'épuration des eaux usées de Delémont et environs (ci-après STEP de Delémont). Mis en œuvre afin de se conformer sur la protection des eaux (OEaux), le système utilise du charbon actif microgranulaire (CAG) dans des réacteurs à lit fluidisé. L'étude a suivi le système pendant environ un an, entre fin 2023 et fin 2024, en analysant l'élimination des micropolluants organiques, les paramètres cumulés, la rétention du charbon actif et le comportement opérationnel dans des conditions météorologiques variables. Le système comprend trois lits fluidisés (CBP1, CBP2, CBP3) fonctionnant en parallèle. Les performances ont été évaluées au regard des objectifs réglementaires et comparées à une installation similaire à la STEP de Penthaz. Les principales conclusions sont les suivantes

### **Efficacité de l'élimination des micropolluants :**

- Temps sec : le processus a atteint de manière fiable l'objectif réglementaire de >80 % d'élimination des substances indicatrices. Les concentrations de diclofénac devraient rester inférieures à la limite réglementaire suisse dans la rivière réceptrice après dilution.
- Épisodes pluvieux : l'efficacité d'élimination a diminué pendant les épisodes pluvieux. Cette baisse était corrélée aux vitesses d'écoulement ascendant, probablement en raison de la réduction du temps de contact et de la dilution des eaux usées.
- Dosage CAG : la variation du dosage de charbon actif en grains ( $\approx 10,5$  à  $15$  mg/L) n'a montré aucune corrélation immédiate avec la performance d'élimination, peut-être en raison des longs temps de rétention des solides ( $> 200$  jours), qui pourraient amortir les changements de dosage à court terme.

### **Rétention du charbon actif :**

- Rétention : le système a démontré une rétention élevée du charbon actif en grains (94 à 100 %), respectant généralement le nouveau seuil recommandé par la VSA de 96 %. La concentration moyenne en carbone dans les effluents était de  $0,26$  mg/L.
- Impact du débit : La rétention est restée élevée même lors d'épisodes de fort débit associées à des épisodes pluvieux.

### **Comportement opérationnel :**

- Dynamique du lit : La hauteur du lit a fluctué, augmentant souvent après la pluie en raison de l'accumulation de matières en suspension (MES), ce qui a nécessité un lavage à contre-courant régulier, en particulier après de fortes pluies.

Recommandations pratiques pour l'exploitation Sur la base des résultats du projet et de l'expérience pratique, les paramètres suivants sont recommandés pour garantir une efficacité d'élimination de 80 %, une élimination suffisante du diclofénac et la rétention du charbon actif, en particulier pendant la phase de démarrage :

- Dosage : maintenir un dosage d'au moins 1,8 mg de charbon CAG par mg de Carbone Organique Dissous (COD) (environ 12-13 mg/L pour des niveaux de COD typiques de 5-7 mg/L) afin d'assurer une marge de sécurité pour une élimination constante.
- Hydraulique : limiter les vitesses hydrauliques du filtre à un maximum de 11-12 m/h semble garantir un temps de contact suffisant (environ 6-8 min temps de contact en lit vide (EBCT)).
- Gestion du lit : viser une hauteur de lit au repos de 1,6 à 1,8 m (fluidisé : 2,0 à 2,7 m).

**Conclusions** Le procédé CAG en lit fluidisé est une technologie éprouvée capable de répondre aux exigences réglementaires. Cependant, ses performances diminuent lors d'événements à haut débit. Les petits ajustements de dosage à court terme sont inefficaces pour le contrôle immédiat du procédé, probablement en raison de l'inertie du système. Une optimisation future pourrait explorer des stratégies d'élimination en deux étapes, telles que le dosage de charbon actif granulé broyé dans le traitement biologique. Des tests supplémentaires sont nécessaires pour explorer cette possibilité.

## 1 Introduction

Les micropolluants organiques (MPO) tels que les produits pharmaceutiques, les pesticides et les produits chimiques industriels ne sont souvent pas entièrement éliminés dans les STEP conventionnelles, ce qui entraîne leur rejet dans les milieux aquatiques naturels. Le 1er janvier 2016, un amendement à l'ordonnance suisse sur la protection des eaux est entré en vigueur. Il impose à certaines stations d'épuration, en fonction du nombre d'habitants raccordés et des caractéristiques du milieu récepteur, de mettre en place une étape supplémentaire pour l'élimination des micropolluants (annexe 3.1 de l'OEaux). Les STEP concernées doivent démontrer qu'au moins six des douze substances indicatrices définies sont éliminées à hauteur d'au moins 80 %.

Depuis l'entrée en vigueur de cette modification, de nombreuses stations d'épuration municipales suisses ont été modernisées et équipées d'un système d'ozonation, d'adsorption sur charbon actif ou d'une combinaison des deux. Ces dernières années, le procédé Carboplus s'est imposé comme une solution alternative pour éliminer les micropolluants et a été mis en œuvre dans plusieurs stations d'épuration suisses. Ce procédé utilise un lit fluidisé ascendant de charbon actif granulaire, généralement installé en aval du traitement biologique (par exemple après la clarification secondaire). Le charbon

actif utilisé a une taille de particules comprise entre 0,2 et 0,9 mm et est communément appelé micro-GAC ( $\mu\text{CAG}$ ). Le lit fluidisé est régulièrement injecté avec du  $\mu\text{CAG}$  frais tandis que le  $\mu\text{CAG}$  usagé est extrait. Le  $\mu\text{CAG}$  usagé est extrait en fonction de la hauteur du lit au repos, car celle-ci est interprétée comme un indicateur de la quantité totale de  $\mu\text{CAG}$  dans le lit. La hauteur du lit est surveillée en permanence afin de gérer les extractions de  $\mu\text{CAG}$  et d'éviter toute perte de charbon actif dans les effluents.

Les paramètres de conception les plus importants sont la hauteur du lit au repos, la vitesse d'écoulement ascendant et le dosage de  $\mu\text{CAG}$ . D'après l'expérience acquise à la station d'épuration de Penthaz, une hauteur de lit au repos de 1,5 à 1,7 m, une vitesse d'écoulement ascendant de 7 à 16 m/h et un dosage de  $\mu\text{CAG}$  de  $13 \text{ mg}_{\mu\text{CAG}} / \text{l}$  (environ  $2 \text{ g}_{\mu\text{CAG}} / \text{g}_{\text{COD}}$ ) semblent adéquats pour se conformer à l'ordonnance suisse sur la protection des eaux (Albers et al., 2022 ; Grelot et al., 2021) . Le temps de contact (Empty Bed Contact Time : EBCT) calculé à partir de la hauteur du lit au repos se situe entre 5 et 15 minutes et est nettement plus court que dans la filtration GAC traditionnelle. On suppose que l'injection de charbon actif frais et la cinétique d'adsorption rapide due à la petite taille des particules de  $\mu\text{CAG}$  compensent l'EBCT plus court. La hauteur du lit expansé se situe généralement entre 2,0 et 2,6 m (Albers et al., 2022) . Cependant, l'expansion du lit peut varier en fonction de la distribution granulométrique, de la densité du  $\mu\text{CAG}$  utilisé et de la vitesse de l'eau. D'après les données issues d'essais pilotes, plus de 95 % du charbon actif est retenu dans le lit fluidisé (VSA-Plattform Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen, 2019) .

La mise en œuvre du procédé Carboplus est prévue dans de nombreuses autres stations d'épuration suisses. Bien que le procédé soit considéré comme mature, peu de données opérationnelles sont disponibles et certaines lacunes subsistent, notamment en ce qui concerne la perte de  $\mu\text{CAG}$  dans les effluents, le taux d'injection de  $\mu\text{CAG}$  requis et l'élimination des micropolluants organiques lors des épisodes pluvieux. Cette étude vise à combler certaines de ces lacunes en répondant aux questions de recherche suivantes :

**Rétention du charbon actif** : quel est le taux de rétention du charbon actif dans différentes conditions de fonctionnement ? Le lavage à contre-courant peut-il augmenter la rétention ? Un filtre supplémentaire est-il nécessaire après les lits fluidisés ?

**Taux d'injection de  $\mu\text{CAG}$**  : quel est le taux d'injection de  $\mu\text{CAG}$  idéal pour obtenir une élimination de 80 % des substances indicatrices ? Quelle est la hauteur optimale du lit de charbon ? Quelle est la quantité de charbon présente dans le système et combien de temps reste-t-elle dans le système ?

**Fonctionnement en cas de pluie** : comment le système Carboplus réagit-il à court et moyen terme à l'augmentation des apports (réduction du temps de contact, rétention des solides, etc.) ? Des mesures

opérationnelles peuvent-elles potentiellement atténuer l'effet de la dilution des matrices d'eaux usées et de l'augmentation des débits ?

**Stratégies de dosage** : quelle stratégie de contrôle/régulation s'est avérée efficace pour garantir la réalisation de l'objectif de qualité, en particulier lors d'épisodes pluvieux ? Une stratégie de dosage optimisée ou un dosage par lots de GAC peuvent-ils améliorer l'élimination des micropolluants ?

**Conception** : quelle est la vitesse de filtration maximale qui permet encore des temps de contact suffisamment longs ? Un temps de contact suffisant est-il maintenu à un débit de 15 m/h ? À quoi ressemble un régime de filtration optimisé lorsque l'on utilise plusieurs réacteurs ?

La station d'épuration de Delémont, qui a mis en œuvre le procédé Carboplus en avril 2022, offre la possibilité de recueillir davantage d'informations sur le procédé. Afin de répondre aux questions de recherche ci-dessus, le procédé Carboplus de la station d'épuration de Delémont a été surveillé pendant environ un an, par temps sec et par temps de pluie, et à différents débits d'injection de  $\mu\text{CAG}$ . Des échantillons d'eaux usées ont été prélevés régulièrement et analysés pour déterminer les concentrations en micropolluants organiques, la perte de  $\mu\text{CAG}$  dans l'effluent et des paramètres cumulés tels que les matières en suspension totales (TSS), la turbidité, le coefficient spectrale d'absorption spectrale à 254 nm (CAS254) et le carbone organique dissous (COD). Les données opérationnelles telles que les vitesses d'écoulement, les hauteurs du lit pendant le fonctionnement, les hauteurs du lit au repos, etc. ont été fournies par l'exploitant de la STEP. Les données combinées ont été analysées et utilisées pour répondre aux questions de recherche susmentionnées. Cette étude comble certaines lacunes dans les connaissances relatives à la conception et au fonctionnement du procédé Carboplus et fournit des informations précieuses aux ingénieurs et aux exploitants de stations d'épuration.

## 2 Matériel et méthodes

### 2.1 STEP de Delémont et environs

La station d'épuration de Delémont, exploitée par le Syndicat pour l'assainissement des eaux usées de Delémont et environs (SEDE), est une installation moderne de traitement des eaux usées conçue pour desservir une population équivalente à 50 000 habitants. Elle utilise plusieurs procédés pour transformer les eaux usées domestiques et industrielles brutes en eau propre pouvant être rejetée en toute sécurité dans la rivière Birse.

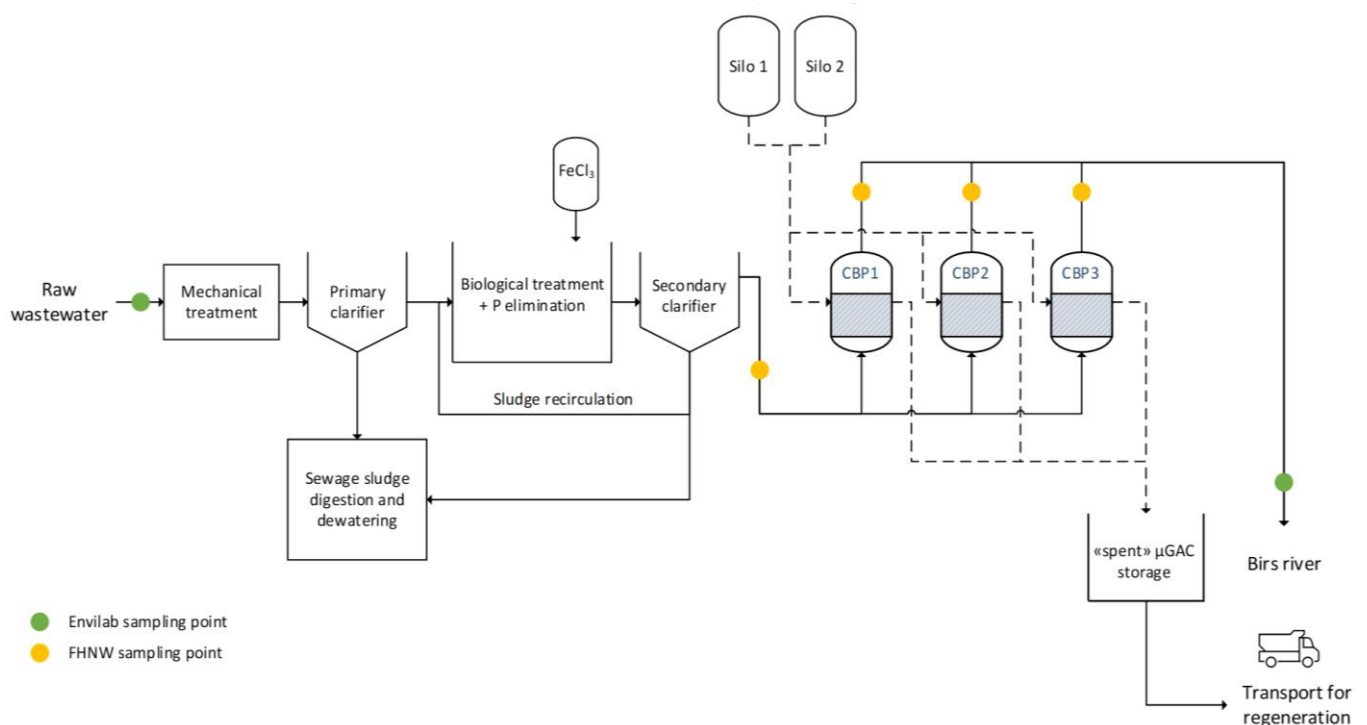


Figure 1 : Schéma simplifié de la station d'épuration de Delémont, comprenant l'étape d'élimination des OMP avec trois réacteurs Carboplus en parallèle (CBP1, CBP2 et CBP3) et les points d'échantillonnage pour l'analyse des micropolluants.

Les procédés de traitement sont les suivants :

- **Déssablage et dégraissage :** Les eaux usées tamisées passent ensuite dans une chambre de dégrillage et de déshuilage. Le débit de l'eau est considérablement ralenti, ce qui permet aux matières inorganiques lourdes mais fines, telles que le sable et le gravier, de se déposer au fond pour être éliminées. Cette étape est essentielle, car les sables sont très abrasifs et peuvent user les pompes et les canalisations. Simultanément, les matières plus légères, telles que les graisses et les huiles, remontent à la surface, où elles sont écumées.

- Clarification primaire : l'eau passe ensuite dans des clarificateurs primaires fonctionnant en parallèle. Il s'agit de grands bassins dans lesquels l'eau reste pendant plusieurs heures. Grâce à une simple sédimentation par gravité, une partie importante des solides organiques en suspension se dépose au fond pour former des boues primaires. L'objectif principal de cette étape est de réduire la concentration en matières organiques, ce qui allège la charge de la phase de traitement biologique suivante, la rendant plus efficace et plus rentable.
- Traitement biologique (boues activées) : cette étape utilise des processus biologiques naturels pour éliminer les matières organiques dissoutes et les nutriments. Le cœur de cette phase est le processus des boues activées. L'eau provenant des décanteurs primaires entre dans un grand bassin contenant une forte concentration de micro-organismes appelés boues activées. Nitrification (zone aérobie) : de l'air est injecté dans cette zone pour créer un environnement riche en oxygène. Ici, les bactéries aérobies consomment les polluants organiques dissous comme nourriture. Au cours de ce même processus, elles transforment l'ammoniac toxique ( $\text{NH}_4^+$ ) en nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ).
- Élimination du phosphore : pour éliminer le phosphore, du  $\text{FeCl}_3$  est ajouté à l'eau. Ce produit chimique agit comme un coagulant, réagissant avec le phosphate dissous pour former des particules solides stables et insolubles. Ces solides précipitent ensuite hors de l'eau et sont éliminés avec les boues en excès. L'élimination du phosphore est essentielle pour prévenir l'eutrophisation (prolifération d'algues) dans la rivière réceptrice.
- Carboplus : Le procédé Carboplus a été mis en œuvre en 2022 et comprend trois lits fluidisés (CBP1, CBP2 et CBP3). Par temps sec, deux lits fluidisés fonctionnent en parallèle, tandis que le troisième reste au repos. En cas de pluie, les trois lits fonctionnent en parallèle. Le fonctionnement des lits est alterné afin d'éviter un compactage excessif dû à un repos prolongé. Les lits sont également rincés régulièrement afin d'éliminer les particules de boues activées qui auraient pu s'accumuler. En cas de fortes pluies, une fraction des eaux usées contourne les lits fluidisés et est rejetée directement dans la Birse. Les lits ont une surface de  $42,9 \text{ m}^2$  chacun et une hauteur totale de colonne de  $4,35 \text{ m}$ . La hauteur cible des lits au repos est de  $1,55$  à  $1,65 \text{ m}$ . Les lits fonctionnent à une vitesse ascendante de  $7$  à  $15 \text{ m/h}$ , ce qui donne une hauteur de lit pouvant atteindre  $3,5 \text{ m}$ . Depuis leur mise en service, les lits ont principalement fonctionné à un dose de  $\mu\text{CAG}$  compris entre  $10,5$  et  $15 \text{ mg/l}$  (Tableau 1). Les injections de  $\mu\text{CAG}$  ont lieu à intervalles réguliers tous les  $8\ 500 \text{ m}^3$  d'eaux usées traitées. Le dosage de  $\mu\text{CAG}$  a été modifié au fil du temps, les opérateurs de la station d'épuration cherchant à optimiser le procédé. Certaines modifications, telles que la définition de différents débits d'injection de  $\mu\text{CAG}$  entre le 15 février 2024 et le 12 mai 2024, ont été apportées spécifiquement pour cette étude (voir tableau ci-dessous).

Tableau 1 : débits d'injection de  $\mu\text{CAG}$  dans les lits Carboplus CBP1, CBP2 et CBP3.

Période	CBP1 (mg $\mu\text{CAG}$ /l)	CBP2 (mg $\mu\text{CAG}$ /l)	CBP3 (mg $\mu\text{CAG}$ /l)
24.03.2022 - 11.05.2022	15	15,0	15
11.05.2022 - 23.08.2022	20,0	20	20
23.08.2022 - 30.11.2022	15,0	15,0	15
30.11.2022 - 21.02.2023	14,0	14,0	14,0
21.02.2023 - 03.04.2023	13,0	13,0	13,0
03.04.2023 - 12.06.2023	14,0	14,0	14,0
12.06.2023 - 10.07.2023	12,8	12,8	12,8
10.07.2023 - 30.07.2023	12,5	12,5	12,5
30.07.2023 - 08.09.2023	12,3	12,3	12,3
08.09.2023 - 21.11.2023	12,0	12,0	12,0
21.11.2023 - 21.12.2023	11,5	11,5	11,5
21.12.2023 - 28.12.2023	13,5	13,5	13,5
28.12.2023 - 16.01.2024	14,5	14,5	14,5
16.01.2024 - 15.02.2024	14,0	14,0	14,0
15.02.2024 - 12.05.2024	14,0	12,5	11,5
12.05.2024 - 06.06.2024	13,5	13,5	13,5
06.06.2024 - 16.06.2024	10,5	10,5	10,5
16.06.2024 - 06.07.2024	12,0	12,0	12
06.07.2024 - 25.09.2024	13,5	13,5	13,5

La durée moyenne de séjour du charbon actif dans les lits est comprise entre 212 et 277 jours. Elle peut varier en fonction de la hauteur du lit au repos, du dosage de  $\mu\text{CAG}$  et d'autres facteurs. Au moment de cette étude, le procédé Carboplus à Delémont était en service depuis 570 jours et le charbon dans les lits avait été remplacé environ 2 à 2,5 fois (premier remplacement complet prévu vers janvier 2023). Il convient de noter que pendant la phase de démarrage, tout le charbon est neuf, ce qui se traduit par une performance élevée en matière d'adsorption des micropolluants. Les configurations des procédés de la STEP de Delémont et de la STEP de Penthaz, qui a également mis en œuvre le procédé Carboplus, sont assez similaires (Tableau 2 ). Cependant, le procédé Carboplus de la STEP de Penthaz fonctionne avec une hauteur de lit au repos légèrement inférieure et une vitesse ascendante maximale légèrement supérieure, ce qui se traduit par un EBCT plus faible (Tableau 2 ). Une différence notable entre les procédés des deux STEP est que l'effluent secondaire de la STEP de Penthaz subit une pré-filtration à l'aide d'un filtre à disques, alors qu'aucune filtration de ce type n'est effectuée à la STEP de Delémont. Dans la publication de Mailler et al. (2016), le dosage de  $\mu\text{CAG}$  a été identifié comme un paramètre crucial qui influence considérablement les performances. Par exemple, l'élimination moyenne

de 13 produits pharmaceutiques clés a atteint 78 à 89 % à une dose de 20 g/m<sup>3</sup>, mais est tombée à 57 à 68 % à 10 g/m<sup>3</sup> (Mailler et al., 2016) . L'étude suggère que pour atteindre une élimination moyenne de 80 % de ces composés, il est nécessaire de fonctionner à 20 g/m<sup>3</sup>. En ce qui concerne la durée pendant laquelle le charbon reste actif dans le système, un temps de rétention des solides (SRT) optimal de 90 à 100 jours a été déterminé pour le  $\mu$ CAG, qui correspond au point où l'efficacité d'élimination des polluants a atteint son maximum et s'est stabilisée (Mailler et al., 2016). Ce délai est nettement plus long que le SRT de 5 à 7 jours habituel pour le charbon actif en poudre (CAP). Ce long temps de séjour du  $\mu$ CAG a également permis la formation d'un biofilm dans le réacteur, ce qui a contribué à l'activité biologique (Mailler et al., 2016). Il est important de distinguer le temps de séjour du charbon du temps de contact avec l'eau, qui a été estimé beaucoup plus court, entre 10 et 20 minutes.

Tableau 2 : Comparaison de l'installation Carboplus à la STEP de Penthaz et à la STEP de Delémont (Grelot et al., 2021 ; VSA, 2021) , et expérience pilote à la STEP Seine Centre (Paris) (Mailler et al., 2016).

Paramètres du processus	STEP de Penthaz	STEP de Delémont	Mailler et al. (2016)
Échelle	À grande échelle	À grande échelle	Échelle pilote
Type $\mu$ CAG	Cyclecarb 305 (Chemviron)	Cyclecarb 305 (Chemviron)	Cyclecarb 305 (Chemviron)
Surface du lit	2 x 12,25 m <sup>2</sup>	3 x 42,9 m <sup>2</sup>	4 m <sup>2</sup>
Hauteur du lit au repos (cible)	1,5 m	1,55 m	1,5 - 2 m
Hauteur du lit fluidisé	1,6 - 2,8 m	1,8 - 3,5 m	NA
Vitesse du flux ascendante	5,4 - 6,8 m/h	7 - 15 m/h	15 m/h
EBCT	4,5 - 13 min	6 à 15 min	10 à 20 min
Dosage $\mu$ CAG	12,5 - 16,4 mg/l	11 - 15 mg/l	10 – 20
Âge du $\mu$ CAG	≈ 350 j	212 – 277 j	90 - 100

NA : Données non disponibles.

## 2.2 Échantillonnage des eaux usées

Dans le cadre de cette étude, les effluents du clarificateur secondaire et les effluents de chaque lit Carboplus ont été échantillonnés pour l'analyse des micropolluants, la détermination de la perte de  $\mu$ CAG et l'analyse des paramètres cumulés (échantillons composites de 48 heures, 5 L par échantillon). Les échantillons ont été prélevés pendant les périodes suivantes : 21.10.2023 - 11.12.2023, 13.02.2024 - 24.03.2024 et 24.07.2024 - 25.09.2024.

### 2.3 Mesure des micropolluants organiques

Les échantillons ont été préparés pour l'analyse des micropolluants organiques par filtration à l'aide de filtres en fibre de verre de 0,4 µm (Macherey-Nagel, Allemagne). Les concentrations des douze substances indicatrices ont été déterminées par injection directe en chromatographie liquide couplée à la spectrométrie de masse en tandem (HPLC-MS/MS, Agilent Technologies, Allemagne) sans préconcentration. La séparation a été réalisée par une HPLC en gradient (eau/acétonitrile, acide formique à 0,1 %) avec une colonne ACQUITY HSS T3 UPLC e (1,8 µm, 3,0 x 100 mm, Waters, Suisse). À l'exception de l'hydrochlorothiazide et de l'acésulfame, la détection et la quantification des substances indicatrices ont été effectuées en mode MS positif sur la base d'ions fragmentaires appropriés. Le 4- et le 5-méthylbenzotriazole n'ont pas pu être quantifiés indépendamment l'un de l'autre à l'aide de cette méthode, c'est pourquoi les concentrations déterminées s'appliquent de manière égale aux deux substances. Des étalons internes ont été ajoutés à tous les échantillons et utilisés afin de corriger les effets de matrice et d'assurer la précision analytique.

Tableau 3 : Quotients des ions initiaux ou fragmentés, ainsi que limites de détection et de détermination (LOD ou LOQ) des substances indicatrices dans la mesure LC-MS/MS. Catégorie selon l'OEaux (2016).

Substance	Catégorie	Rt [min]	MS1 m/z	MS2 m/z	LOD [µg/L]	LOQ [µg/L]
Acésulfame	-	2,3	162,0	82	0,010	0,05
Gabapentine	-	5,8	172,1	154,1	0,015	0,05
Amisulpride	1	6,6	370,2	242,1	0,010	0,05
Carbamazépine	1	8,5	237,0	194,0	0,005	0,05
Citalopram	1	7,9	325,2	109,2	0,015	0,05
Méthoprolol	1	7,0	268,2	72,1	0,010	0,05
Venlafaxine	1	7,5	278,0	58,2	0,005	0,05
Clarithromycine	1	8,6	748,4	158,2	0,015	0,05
Diclofénac	1	10,3	296,0	214,0	0,005	0,05
Hydrochlorothiazide	1	6,1	296,0	268,9	0,015	0,05
Irbésartan	2	8,7	429,3	207,2	0,005	0,05
Benzotriazole	2	6,6	120,0	65	0,001	0,05
Candesartan	2	8,9	440,9	262,9	0,005	0,05
4- et 5-méthylbenzotriazole	2	7,4	134,1	77,2	0,005	0,05

Afin d'élargir l'ensemble de données existant, l'acésulfame et la gabapentine, bien qu'ils ne figurent pas parmi les douze substances indicatrices, ont également été mesurés et leur efficacité d'élimination a été évaluée. Parallèlement aux mesures effectuées dans le cadre de ce projet, la campagne de surveillance de l'élimination des OMP s'est poursuivie. Envilab a été choisi comme laboratoire d'analyse à cette fin.

Les résultats ont été fournis afin de permettre une comparaison directe avec les concentrations mesurées par la FHNW.

#### **2.4 Mesure de la perte de $\mu$ CAG**

La concentration en charbon actif dans l'effluent des lits fluidisés de  $\mu$ CAG a été mesurée par analyse d'images méthode MIPA2C selon (Pulfer et al., 2024). Des mesures en triple ont été effectuées en utilisant un volume d'échantillon de 0,5 L par mesure. Pour le contrôle qualité, les échantillons ont été enrichis avec 0,1 mg PAC/L, également en triple. Les échantillons ont été filtrés (0,45  $\mu$ m, Whatman NC45, 50 mm de diamètre, Sigma-Aldrich, États-Unis). Les filtres ont été séchés à 105 °C pendant au moins 4 heures et scannés (scanner EPSON Perfection V600 à 2400 dpi). La concentration en charbon actif a été calculée en déterminant les valeurs RVB à l'aide d'un modèle de régression polynomiale multiple. Pour les triplicats, les LOD et LOQ étaient respectivement de 0,051 mg/L et 0,102 mg/L.

#### **2.5 Mesure des paramètres globaux**

Les échantillons d'eaux usées prélevés dans l'effluent du clarificateur secondaire et dans l'effluent des lits Carboplus ont été analysés pour déterminer les MES (SN EN 872:2005), les SAC254 (DIN EN ISO 10523:2012-04+) et les COD (DIN EN 1484:2019-04+).

### 3 Résultats et discussion

#### 3.1 Paramètres standard

Les concentrations d'ammoniac, de nitrites et de nitrates dans l'effluent de la station d'épuration de Delémont montrent que la nitrification est stable (voir figure ci-dessous). Les concentrations de MES, de DCO et de CDO dans le clarificateur secondaire se situent dans les plages typiques attendues. Les concentrations de COD semblent parfois relativement faibles par rapport aux concentrations de DOC et de TSS, ce qui pourrait être attribué à l'incertitude de mesure.

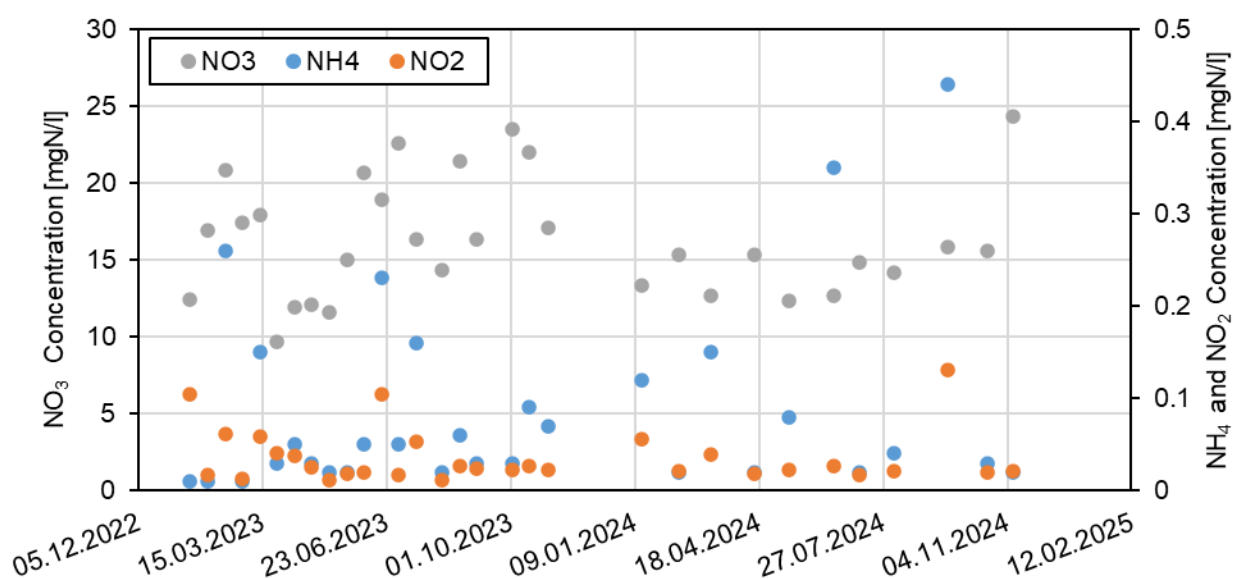


Figure 2 : Concentrations d'ammonium (NH<sub>4</sub>), de nitrites (NO<sub>2</sub>) et de nitrates (NO<sub>3</sub>) dans les effluents de la STEP de Delémont.

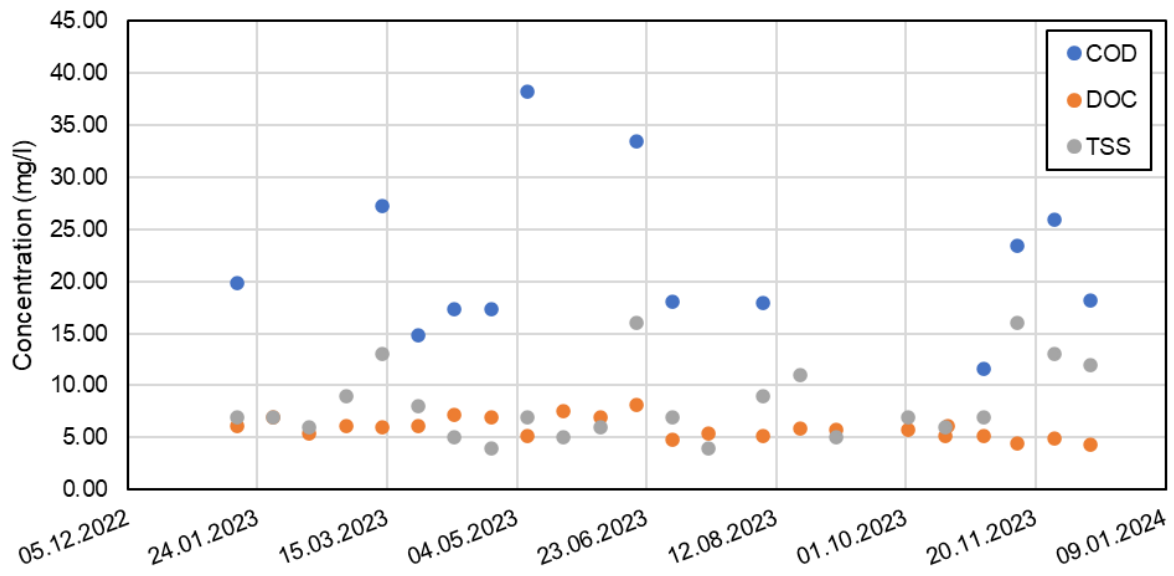


Figure 3 : Concentrations de DCO (DOC), de COD et de TSS (MES) dans l'effluent du clarificateur secondaire de la STEP de Delémont.

### 3.2 Débit d'entrée à la station d'épuration de Delémont

Les données de débit d'entrée de la STEP de Delémont montrent que plusieurs épisodes pluvieux durant la période d'étude. Ces événements ont un impact direct sur les performances du procédé, notamment en raison de l'augmentation des débits et de la dilution des eaux usées.

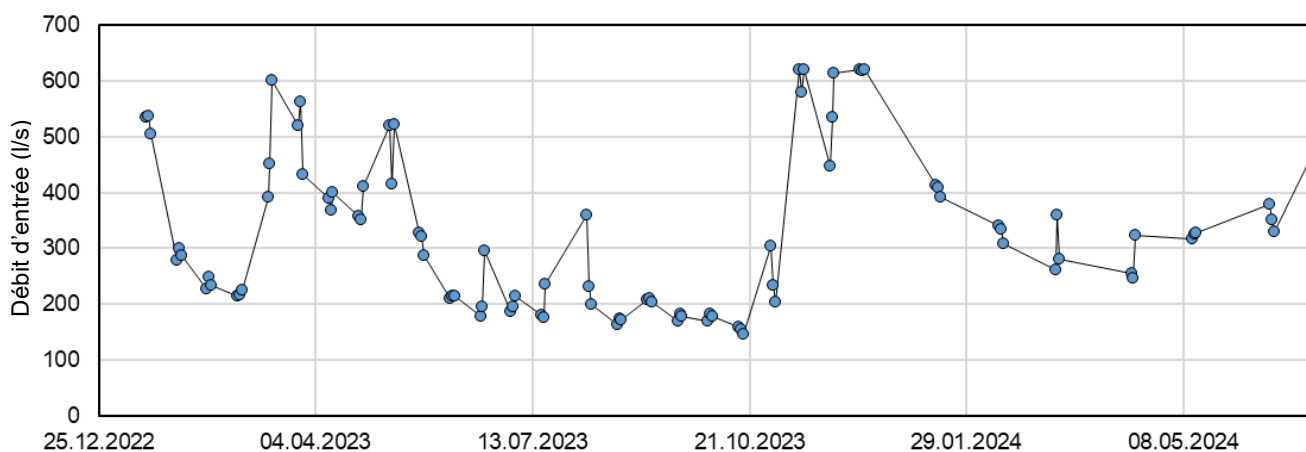


Figure 4 : Débit d'entrée à la STEP de Delémont pendant la période étudiée.

### 3.3 Comportement du lit fluidisé

Les données opérationnelles des lits Carboplus indiquent des fluctuations importantes de la hauteur des lits, tant au repos qu'en fonctionnement. La hauteur des lits au repos était comprise entre 1,4 et 2,5 m, tandis que la hauteur des lits en fonctionnement était comprise entre 1,8 et 3,5 m (Figure 5). La hauteur des lits au repos avait tendance à augmenter suite à des épisodes pluvieux, en raison de l'accumulation de particules de boues activées dans les lits. La hauteur du lit au repos diminuait à nouveau rapidement, en raison du lavage à contre-courant et de l'élimination des particules de boues activées accumulées. En raison de l'accumulation de boues activées, la hauteur du lit au repos n'est pas toujours un bon indicateur de la masse totale de charbon dans un lit. Comme l'EBCT est calculé à partir de la hauteur du lit au repos, il convient également de le considérer avec prudence (sur de longues périodes, il peut être pertinent de calculer un EBCT moyen à partir de la hauteur moyenne du lit au repos).

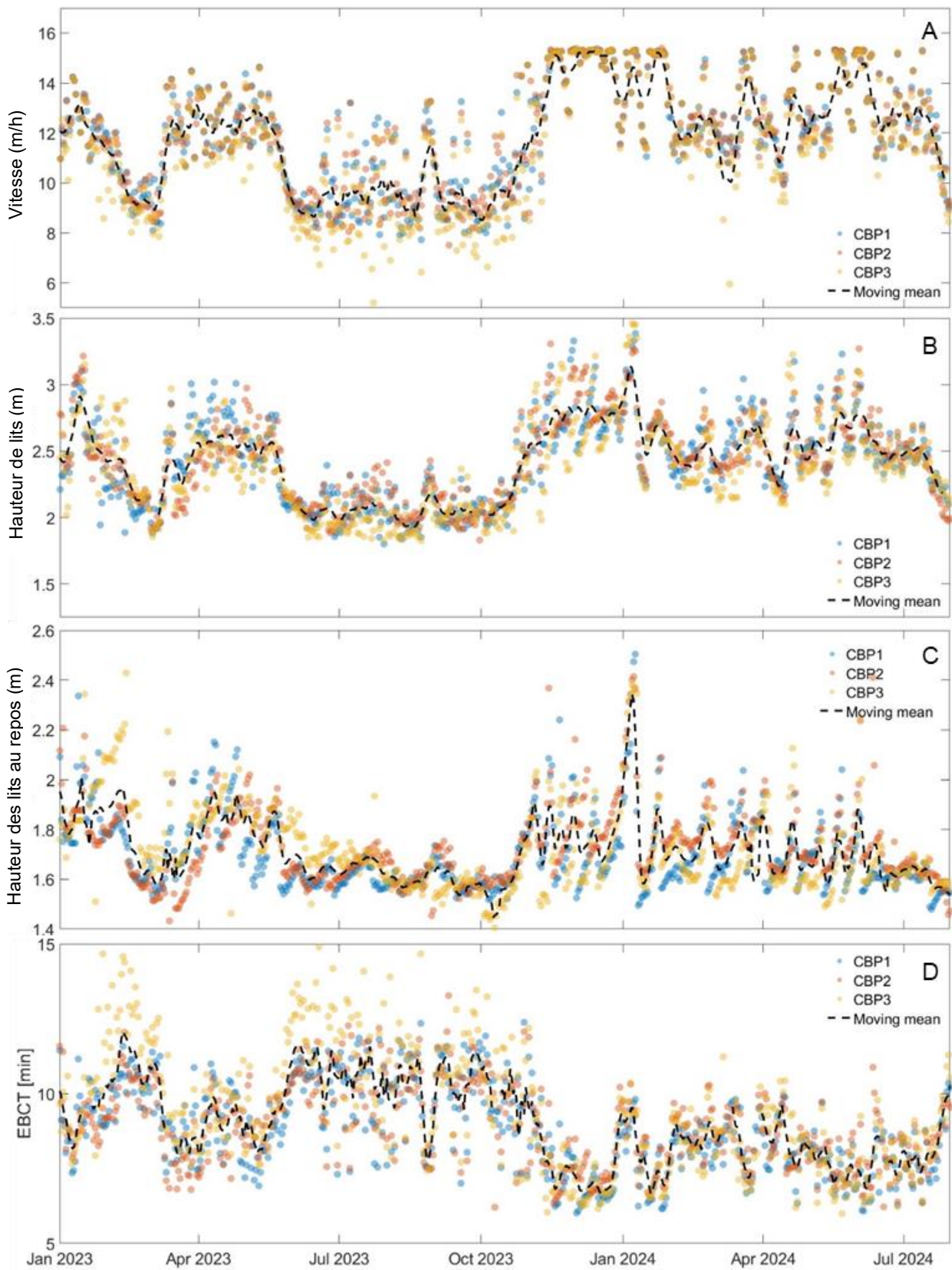


Figure 5 : Données opérationnelles des lits fluidisés (CBP1, CBP2, CBP3) de la STEP de Delémont.

### 3.4 Concentrations de micropolluants

La figure ci-dessous compare les concentrations de micropolluants dans les effluents du clarificateur secondaire de la STEP de Delémont et de la STEP de Penthaz. Les effluents de la STEP de Penthaz présentent des concentrations plus élevées de certains micropolluants. Cette différence peut s'expliquer par des différences régionales d'usage des produits pharmaceutiques, l'activité industrielle ou des différences de composition des eaux d'infiltration. Dans l'ensemble, les concentrations observées sont typiques des stations d'épuration de Suisse occidentale (canton de Vaud, 2019).

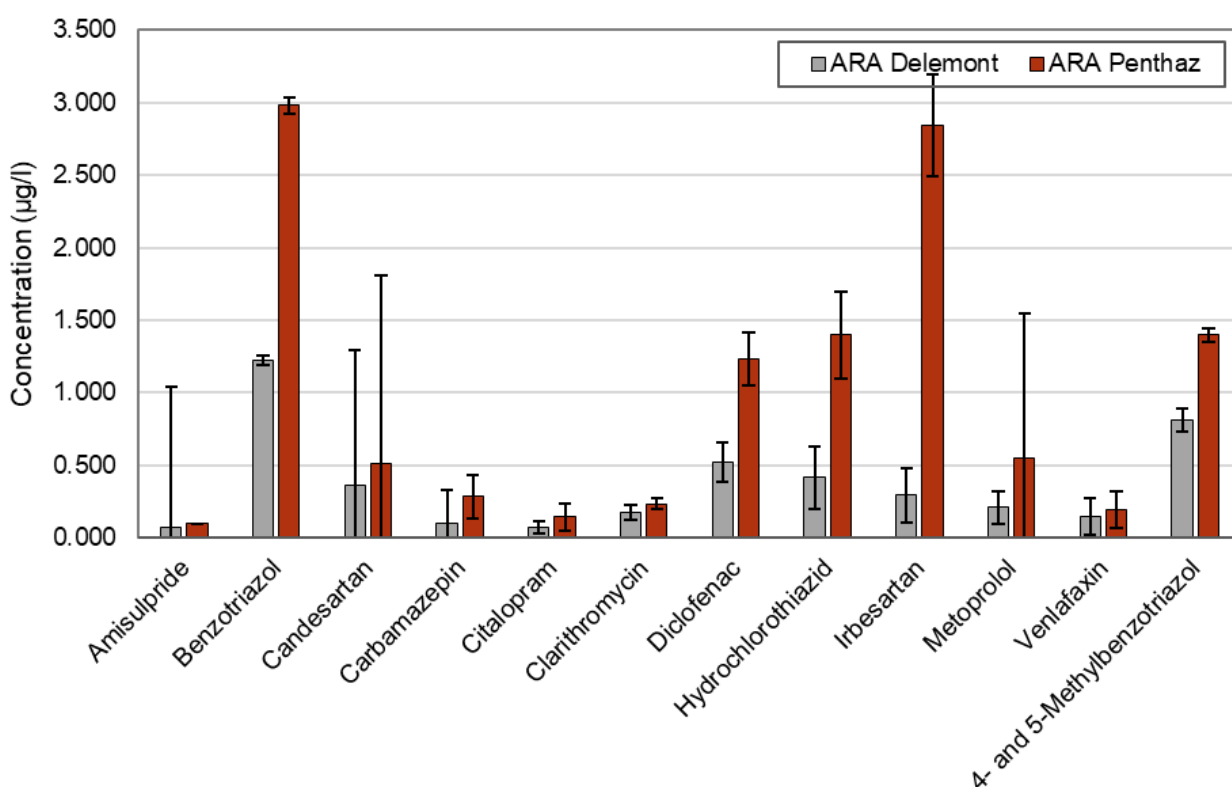


Figure 6 : Concentrations de micropolluants dans les effluents du clarificateur secondaire de la STEP de Delémont et de la STEP de Penthaz.

### 3.5 Élimination des micropolluants

Depuis la mise en œuvre du procédé Carboplus à la STEP de Delémont, les micropolluants des catégories 1 et 2 sont éliminés à un taux moyen supérieur à 80 %, à quelques exceptions près en mars 2023, mai 2023 et novembre 2023 (Figure 7). Selon la législation suisse, le taux d'élimination des substances marqueurs doit être supérieur à 80 %. Il convient toutefois de noter que les douze substances ne doivent pas nécessairement toutes être utilisées pour l'évaluation. Les cantons sont libres de

sélectionner au moins six substances parmi ces douze. Leur moyenne est calculée dans un rapport de 2:1 pour les catégories 1 et 2.

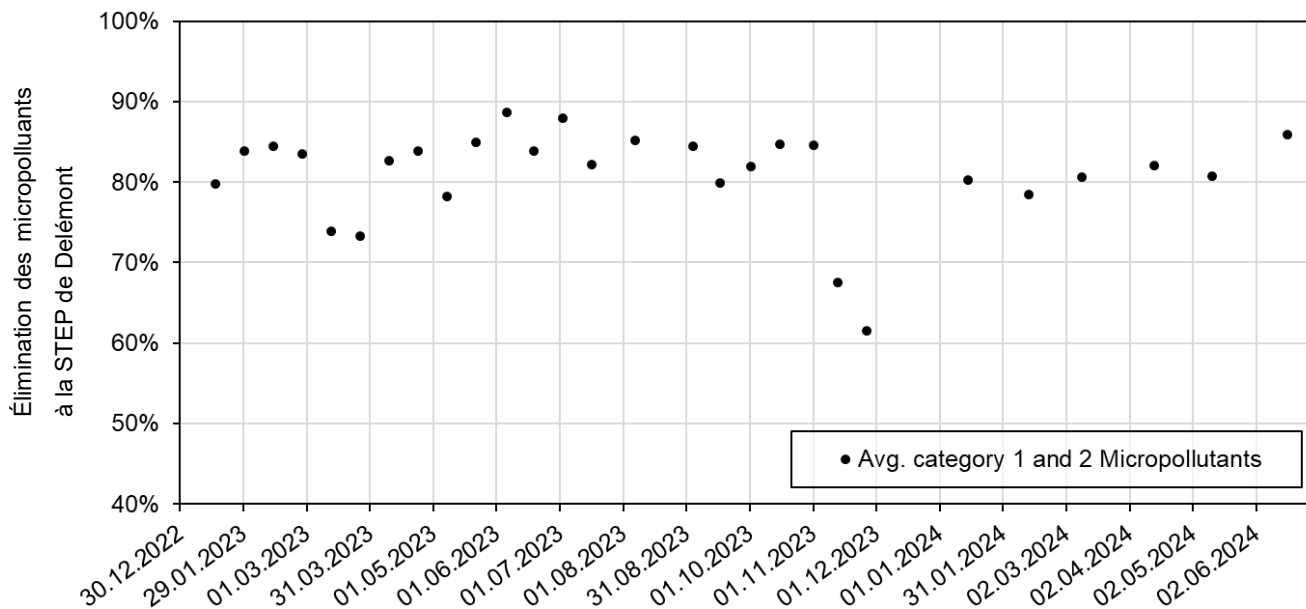


Figure 7 : Élimination des micropolluants de catégorie 1 et 2 à la STEP de Delémont mesurée par Envilab.

Les taux d'élimination des micropolluants mesurés à la STEP de Penthaz sont en moyenne légèrement supérieurs à ceux mesurés à la STEP de Delémont (Figure 8). L'élimination moyenne des 12 micropolluants était de 85 % pour la STEP de Penthaz et de 81 % pour la STEP de Delémont. Le métoprolol, le benzotriazole et les 4- et 5-méthylbenzotriazoles, molécules facilement adsorbables, sont bien éliminés dans les deux stations (c'est-à-dire  $\Delta > 95\%$ ). La carbamazépine et l'hydrochlorothiazide sont adsorbés dans une proportions similaire. Carboplus à Penthaz est exploitée avec une dose de carbone plus élevée qu'à Delémont, ainsi qu'une vitesse ascensionnelle plus lente, ce qui permet un temps de contact plus long pour l'adsorption (soit 13 à 16,5 minutes) qu'à la STEP de Delémont (soit 6 à 11 minutes). La combinaison de ces facteurs pourrait expliquer les performances globales légèrement supérieures de la STEP de Penthaz par rapport à celle de Delémont. Mailler et al. (2016) ont observé, pour un dosage de 10 mgGAC/L, une élimination moyenne du diclofénac d'environ 65 % et, pour une dose de 20 mgGAC/L, une élimination moyenne du diclofénac d'environ 80 %. L'élimination moyenne du diclofénac d'environ 72 % pour un dosage de 11 à 15 mgCAG/L (STEP de Delémont) et la moyenne d'environ 85 % pour un dosage de 12,5 à 16,4 mgCAG/L (STEP de Penthaz) montrent une adsorption du diclofénac légèrement meilleure. En ce qui concerne la carbamazépine, Mailler et al. (2016) ont observé des taux d'élimination compris entre 80 et 95 %, ce qui est légèrement supérieurs à ceux observés pour les STEP de Penthaz et de Delémont.

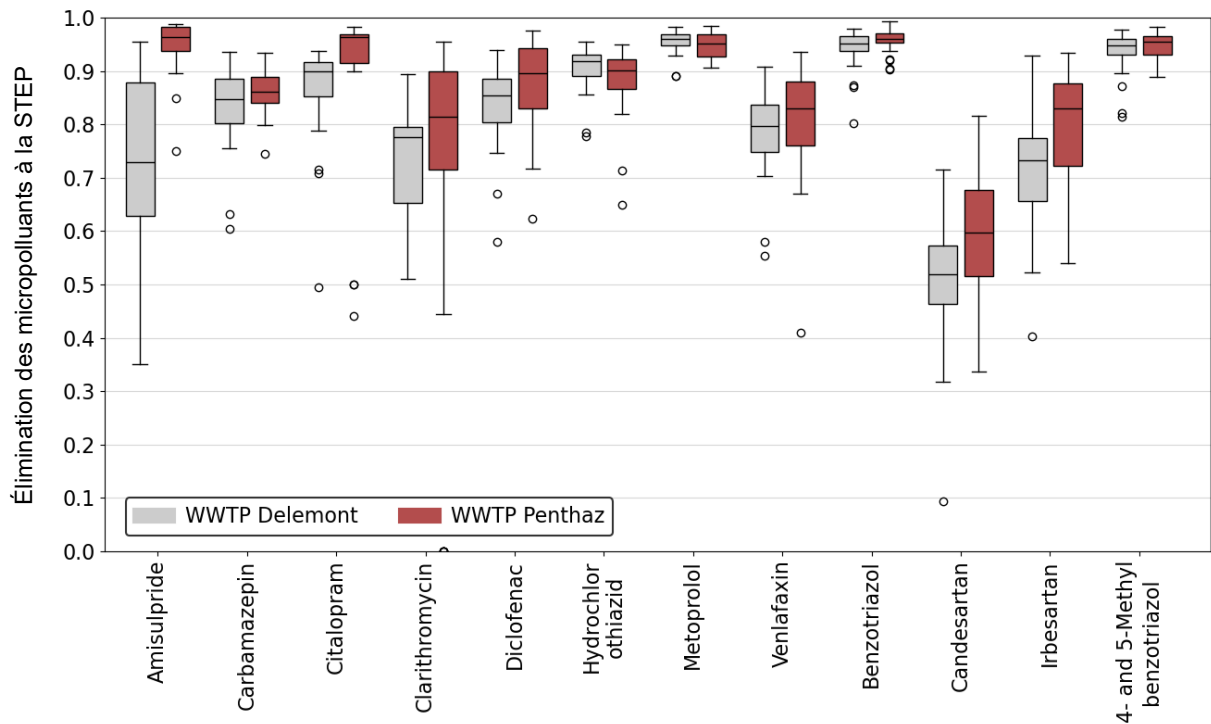


Figure 8 : Élimination des micropolluants dans la STEP de Delémont et dans la STEP de Penthaz (2019-2023).

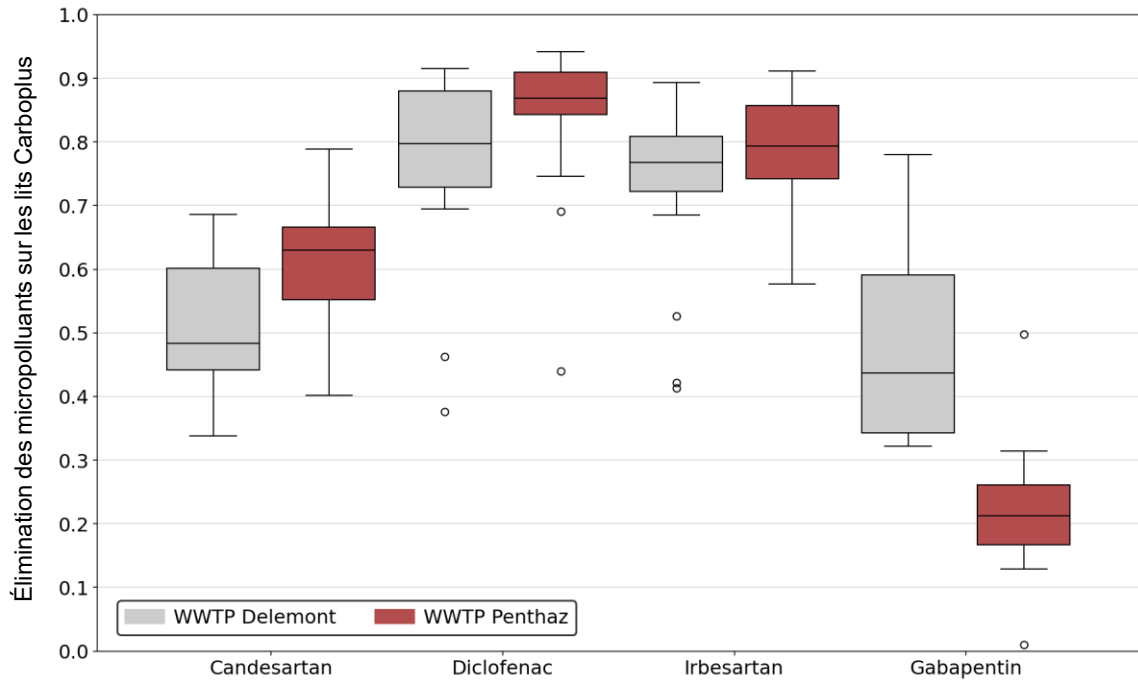


Figure 9 : Élimination des micropolluants sur les lits Carboplu de la STEP de Delémont mesurée par la FHNW par temps sec et élimination sur les lits Carboplu de la STEP de Penthaz (2019-2020).

### 3.6 Élimination des micropolluants à différents taux d'injection de $\mu$ CAG

Les taux d'élimination des micropolluants mesurés au-dessus de la station d'épuration de Delémont ne sont pas corrélés aux taux d'injection de  $\mu$ CAG appliqués, même après normalisés par rapport au COD dans l'effluent du clarificateur secondaire (Figure 10).  $\mu$ CAG. Cela est dû à l'inertie du système liée au long temps de séjour du charbon (212–277 jours)  $\mu$ CAG. En raison du temps de séjour prolongé du charbon dans le lit, compris entre 212 et 277 jours environ, les variations à court terme dosage de  $\mu$ CAG pourraient ne pas avoir d'incidence significative sur la capacité d'adsorption globale du charbon présent dans le lit. En outre, d'autres facteurs, tels que les fluctuations de la hauteur du lit au repos et les épisodes pluvieux, pourraient masquer l'impact du dosage de  $\mu$ CAG sur l'efficacité de l'élimination.

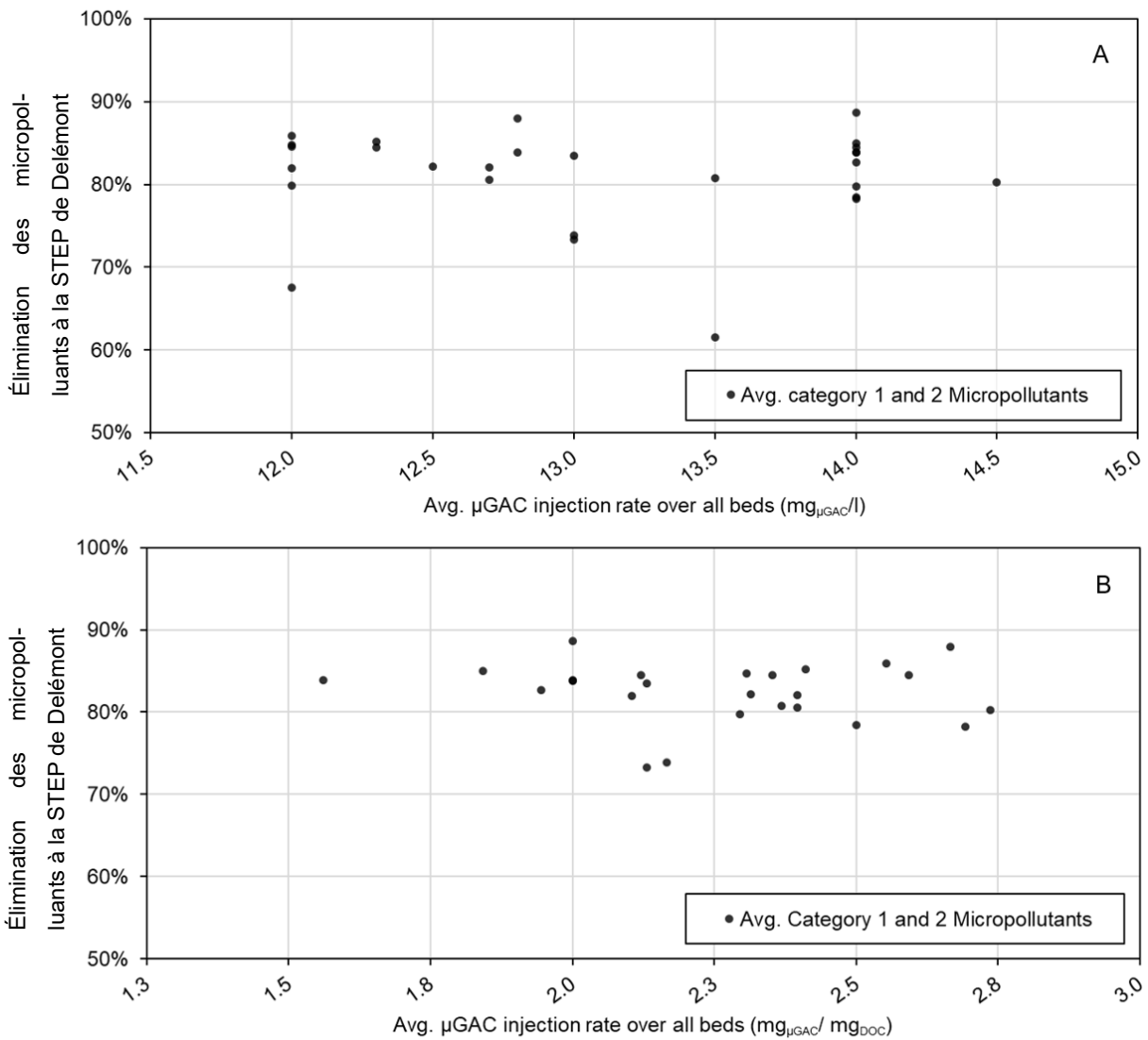


Figure 10 : Élimination des micropolluants mesurée par Envilab au-dessus de la STEP de Delémont par rapport au dosage de  $\mu$ CAG appliqué par litre d'eaux usées (A) et par mg de carbone organique dissous (COD) (B).

Les taux d'élimination des micropolluants mesurés au-dessus de la STEP de Penthaz ne sont pas non plus corrélés aux taux d'injection de  $\mu\text{CAG}$  appliqués (Figure 11 ), probablement pour les mêmes raisons que celles évoquées ci-dessus.

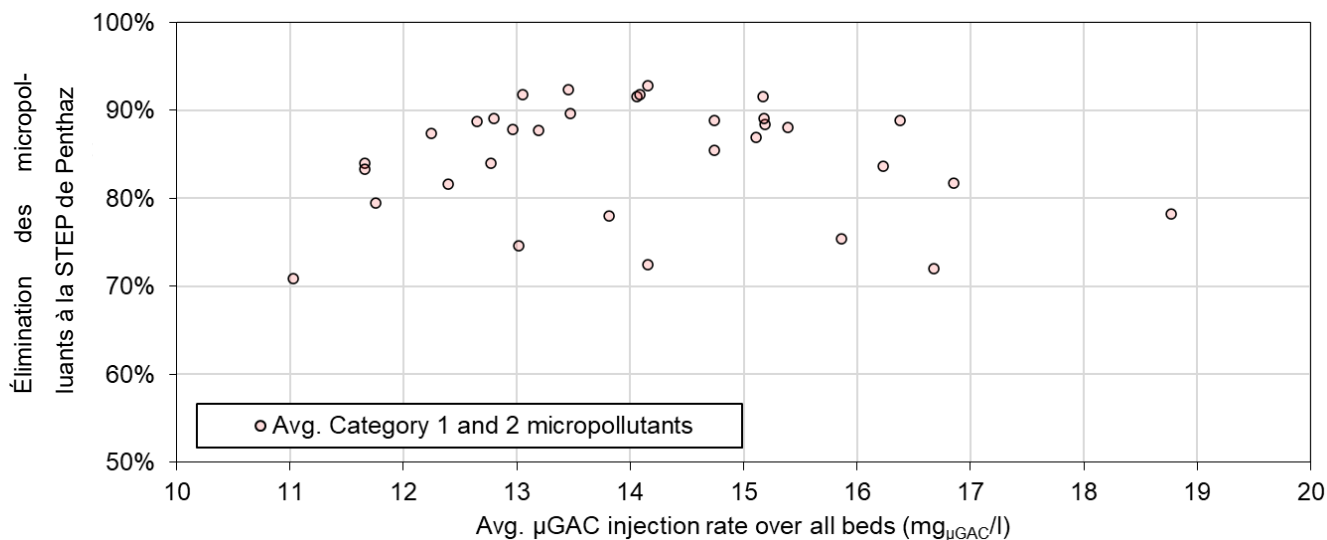


Figure 11 : Élimination des micropolluants mesurée à la STEP de Penthaz par rapport au taux d'injection de  $\mu\text{CAG}$  appliqué par litre d'eaux usées.

Au cours de la période allant de février 2024 à mars 2024, pendant laquelle différents taux d'injection de  $\mu\text{CAG}$  ont été appliqués aux CBP1, CBP2 et CBP3, l'élimination des micropolluants mesurée sur les lits de  $\mu\text{CAG}$  ne correspond pas au taux d'injection de  $\mu\text{CAG}$  (Figure 12). Une élimination légèrement supérieure n'a été observée que pour l'acésulfame (Figure 12).

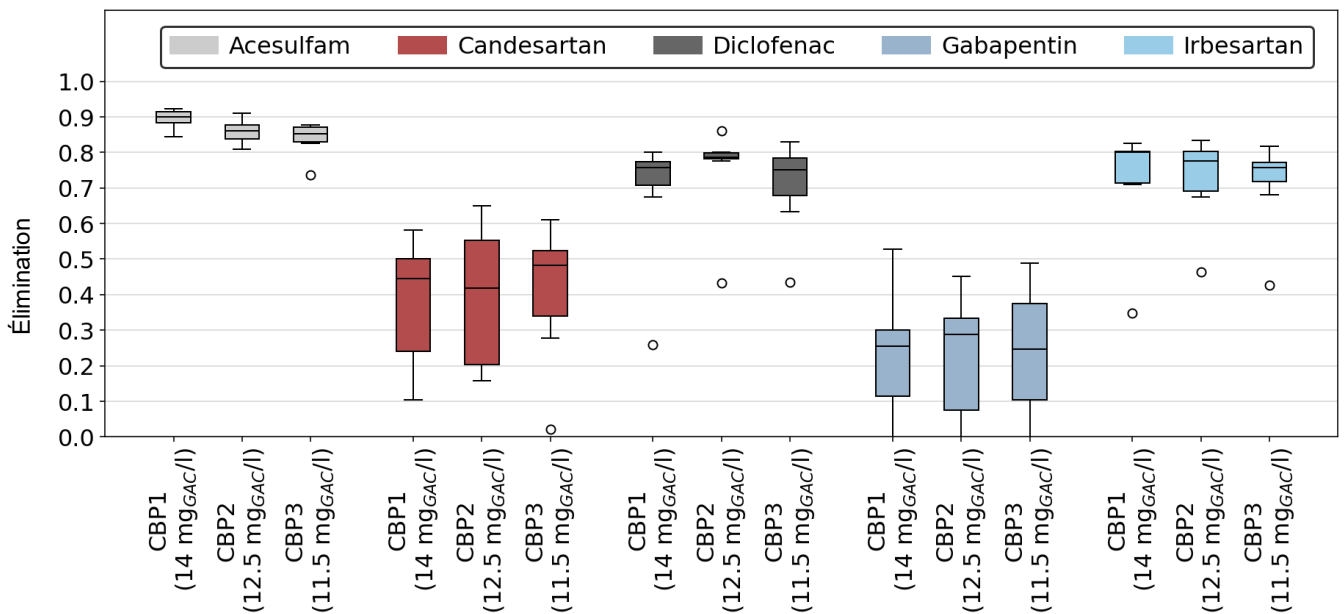


Figure 12 : Élimination des micropolluants sur les lits Carboplus mesurée par la FHNW entre février et mars 2024, période durant laquelle les lits ont fonctionné à différents débits d'injection de  $\mu\text{CAG}$ .

Les taux d'élimination des micropolluants n'ont pas pu être déterminés avec précision pour l'hydrochlorothiazide, le benzotriazole, l'amisulpride, la carbamazépine, le citalopram, la clarithromycine, le métoprolol, la venlafaxine et le 4- et 5- méthylbenzotriazole, car les concentrations dans l'effluent ont été mesurées pour la plupart inférieures à la limite de quantification (LOQ). Sur la période de cette étude, la concentration moyenne d'amisulpride à l'entrée de la STEP (mesurée par Envilab) était de  $0,074 \pm 0,032 \mu\text{g/l}$ , tandis que sa concentration dans l'effluent du clarificateur secondaire (mesurée par la FHNW) était de  $0,068 \pm 0,031 \mu\text{g/l}$ . La concentration des effluents était toujours inférieure à la LOQ. Comme pour l'amisulpride, la carbamazépine, le citalopram, la clarithromycine, le métoprolol, la venlafaxine et le 4- et 5-méthylbenzotriazole ont également été détectés en dessous de la LOQ dans les effluents de l'étape Carboplus.

### 3.7 Élimination des micropolluants pendant les épisodes pluvieux

Les concentrations de micropolluants mesurées par Envilab indiquent une faible élimination au sein de la STEP de Delémont lors d'épisodes pluvieux, caractérisés par une vitesse ascensionnelle élevée (Figure 13 ). Les mécanismes suivants sont susceptibles d'influencer l'élimination pendant ces événements :

- (1) une réduction de l'élimination des micropolluants dans le traitement biologique en raison d'un temps de séjour hydraulique plus court

- (2) une réduction de l'élimination des micropolluants dans le procédé Carboplus en raison d'un temps de contact plus court
- (3) une faible adsorption causée par la dilution des eaux usées
- (4) une désorption causée par la dilution des eaux usées

Compte tenu de l'ensemble des données de cette étude et du fait que tous ces mécanismes se produisent simultanément, la contribution de chacun d'entre eux à l'élimination globale ne peut être isolée déterminée et devrait faire l'objet d'expériences supplémentaires. Pour distinguer l'effet de la réduction du temps de contact de celui de la dilution des eaux usées, les taux d'élimination ont également été tracés pour des débits élevés dans une plage étroite (voir annexe). Les données de la STEP de Delémont et Penthaz concordent substantiellement lorsque la vitesse est comprise entre 4 et 10 m/h. À la STEP de Delémont, lors d'épisodes de fortes pluies, des vitesses supérieures à 11 m/h ont été enregistrées. Dans ces conditions, l'élimination moyenne de plusieurs OMP (voir annexe) a été négativement affectée, et l'élimination moyenne a diminué à 60 % à < 13 m/h. Pour tirer des conclusions définitives sur l'effet de la vitesse, des études pilotes spécifiques devraient être menées. Une attention particulière devrait être accordée à l'effet de la dilution, afin de pouvoir isoler les deux mécanismes.

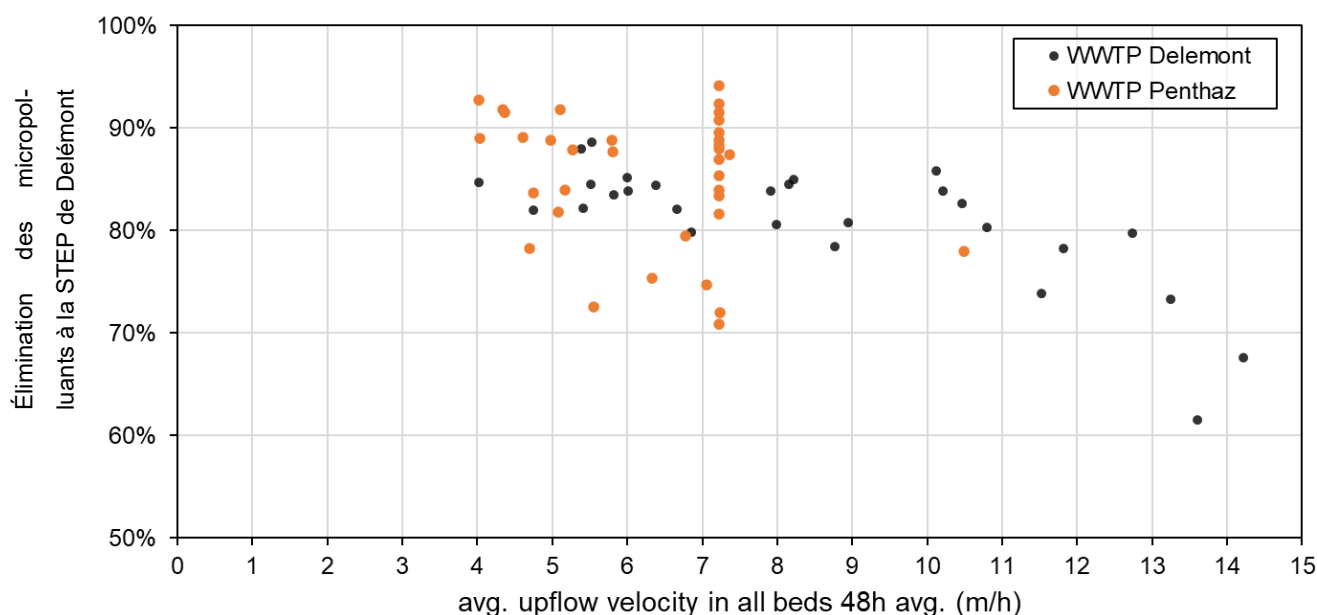


Figure 13 : Élimination des micropolluants dans la station d'épuration de Delémont par rapport à la vitesse moyenne d'écoulement ascendant dans les lits Carboplus.

Les taux d'élimination des micropolluants mesurés sur les lits Carboplus présentent un profil similaire, avec des taux d'élimination plus faibles pour de basses concentrations à l'entrée. Cependant, l'effet de la pluie n'est pas fortement marqué pour l'ensemble des micropolluants (Figure 14 & Figure 15).

L'amisulpride, la carbamazépine, le citalopram, la clarithromycine, le métoprolol, la venlafaxine et le 4- et 5-méthylbenzotriazole sont bien éliminés par l'élimination de ces composés n'est pas aussi fortement affectée par des temps de contact plus courts et des variations de la concentration de l'effluent que celle des composés moins facilement adsorbés (par exemple le candésartan, le diclofénac, l'irbésartan et la gabapentine).

Une mesure potentielle pour augmenter l'élimination des micropolluants pendant les épisodes pluvieux pourrait consister à augmenter temporairement et fortement le taux d'injection de  $\mu$ CAG. Cependant, comme indiqué dans le chapitre précédent, il n'est pas certain que l'effet soit perceptible en raison du long temps de séjour du charbon dans les lits. La recirculation du  $\mu$ CAG usagé (éventuellement broyé pour éviter la sédimentation et l'abrasion) vers le traitement biologique pourrait également être explorée, car les procédés au charbon actif en deux étapes sont plus efficaces que ceux à étape unique (Zwickenpflug et al., 2010) . Cependant, le charbon recirculé ne pourrait alors pas plus être utilisé pour la régénération, ce qui constituerait un inconvénient. Cette optimisation du procédé d'adsorption est fortement recommandée dans de futures expériences.

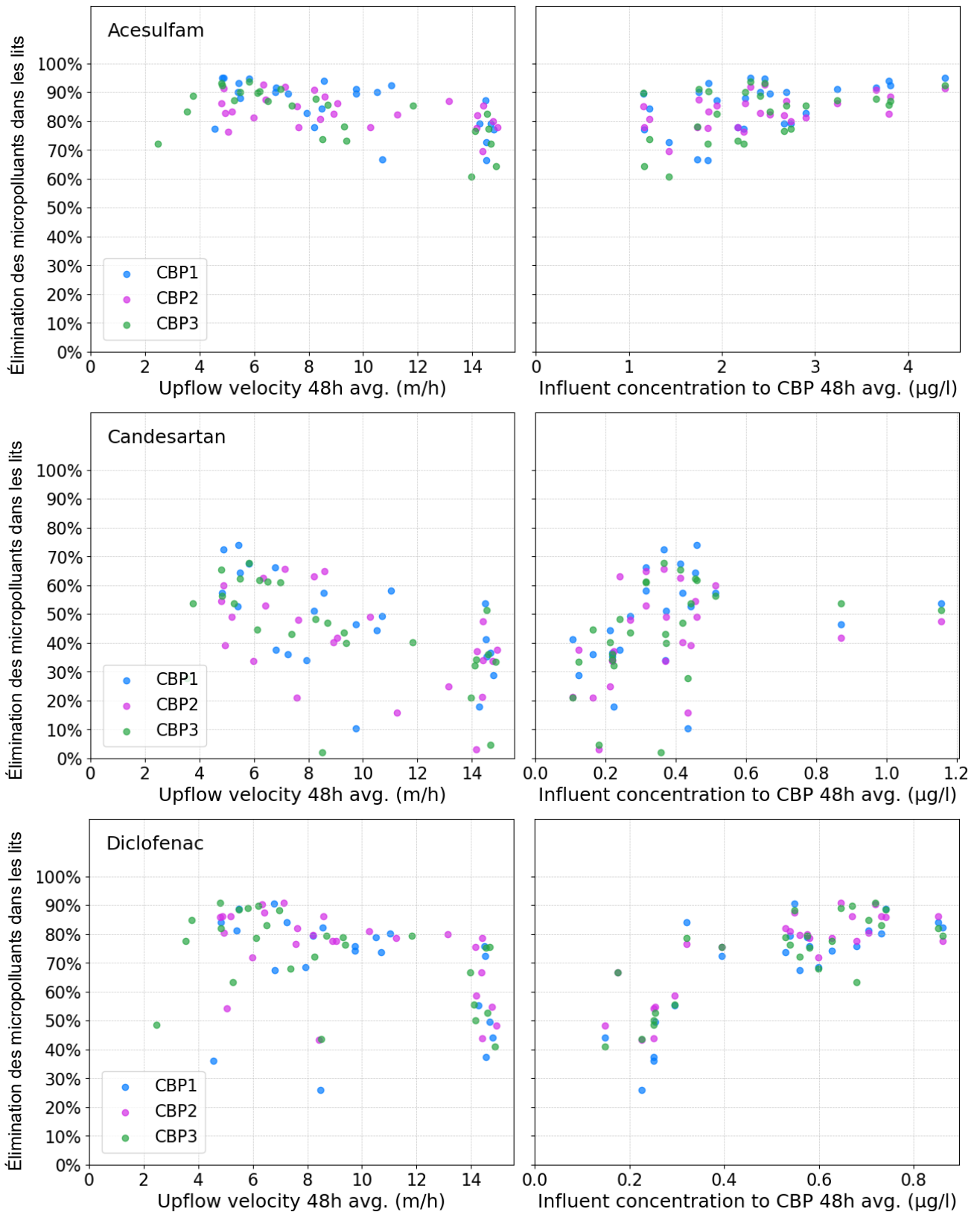


Figure 14 : Élimination des micropolluants dans les lits Carbolplus en fonction de la vitesse d'écoulement ascendant ( à gauche) et de la concentration à l'entrée (à droite).

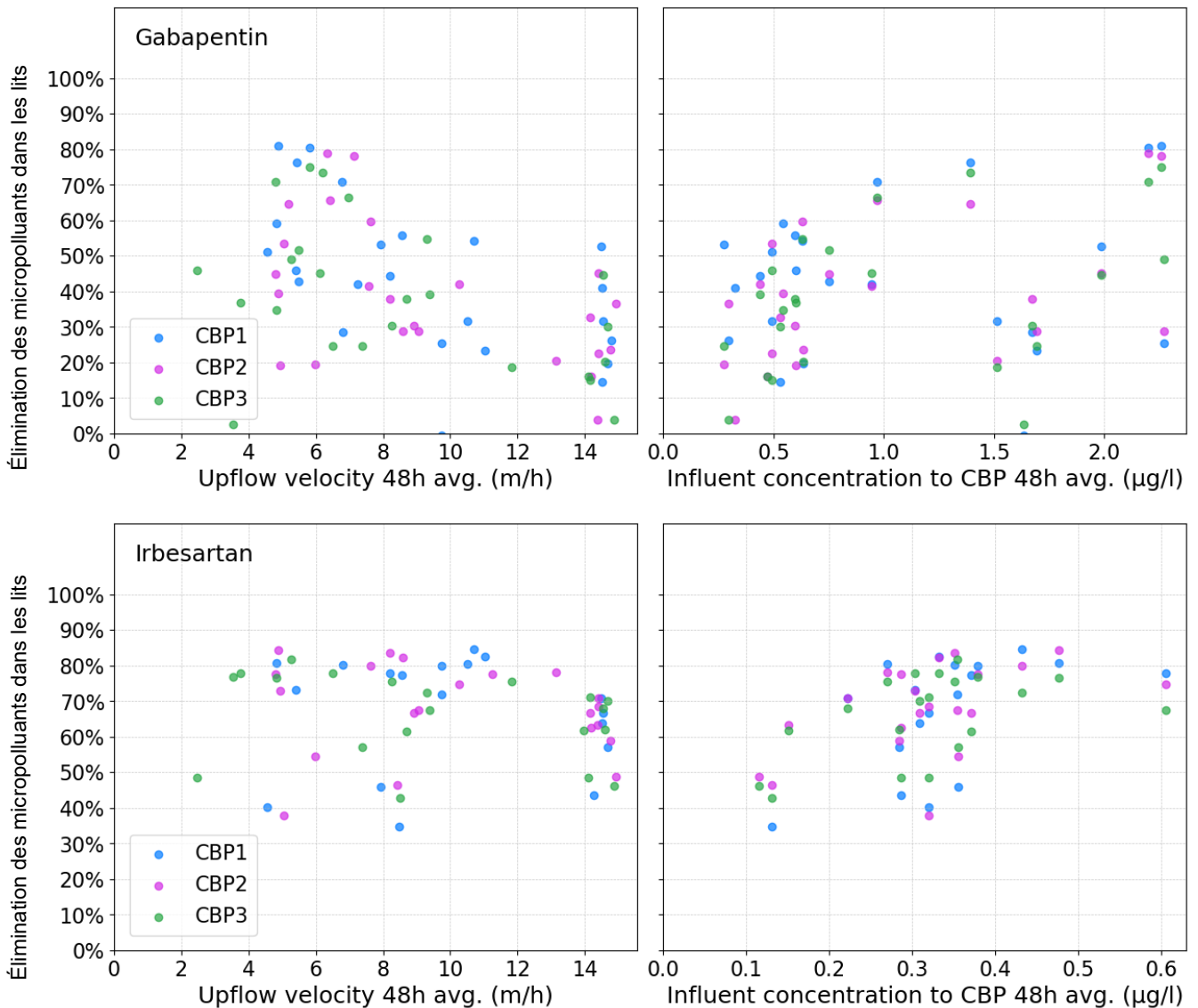


Figure 15 : Élimination des micropolluants dans les lits Carboplus en fonction de la vitesse d'écoulement ascendant (à gauche) et de la concentration à l'entrée (à droite).

### 3.8 Perte de charbon actif

La rétention moyenne de  $\mu\text{CAG}$  dans les lits Carboplus a été de 94 - 100 % (Figure 16). Moins de 10 % des mesures étaient inférieures au nouveau seuil recommandé par le VSA, fixé à 96 % (VSA-Plattform Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen, 2025). Lorsque la rétention du  $\mu\text{CAG}$  a été représentée graphiquement en fonction de la vitesse ascensionnelle, aucune corrélation apparente n'a été observée (Figure 16). La concentration moyenne de carbone dans l'effluent était de 0,26 mg/L. Étant donné que les systèmes de pointe atteignent généralement des concentrations moyennes d'environ 0,4 mg/L ou moins, le procédé Carboplus peut être considéré comme satisfaisant en termes de limitation des pertes

de carbone dans l'effluent. Carboplus semble moins performant que les autres procédés PAC existants en Suisse. Les concentrations de charbon actif et les pertes de charbon actif mesurées sont légèrement plus élevées dans la STEP de Penthaz que dans celle de Delémont (Figure 17). Cependant, la rétention de charbon actif dans les deux cas est largement supérieure au nouveau seuil de 96 % suggéré par le VSA. En comparaison, la rétention de charbon actif en poudre dans d'autres STEP suisses est similaire.

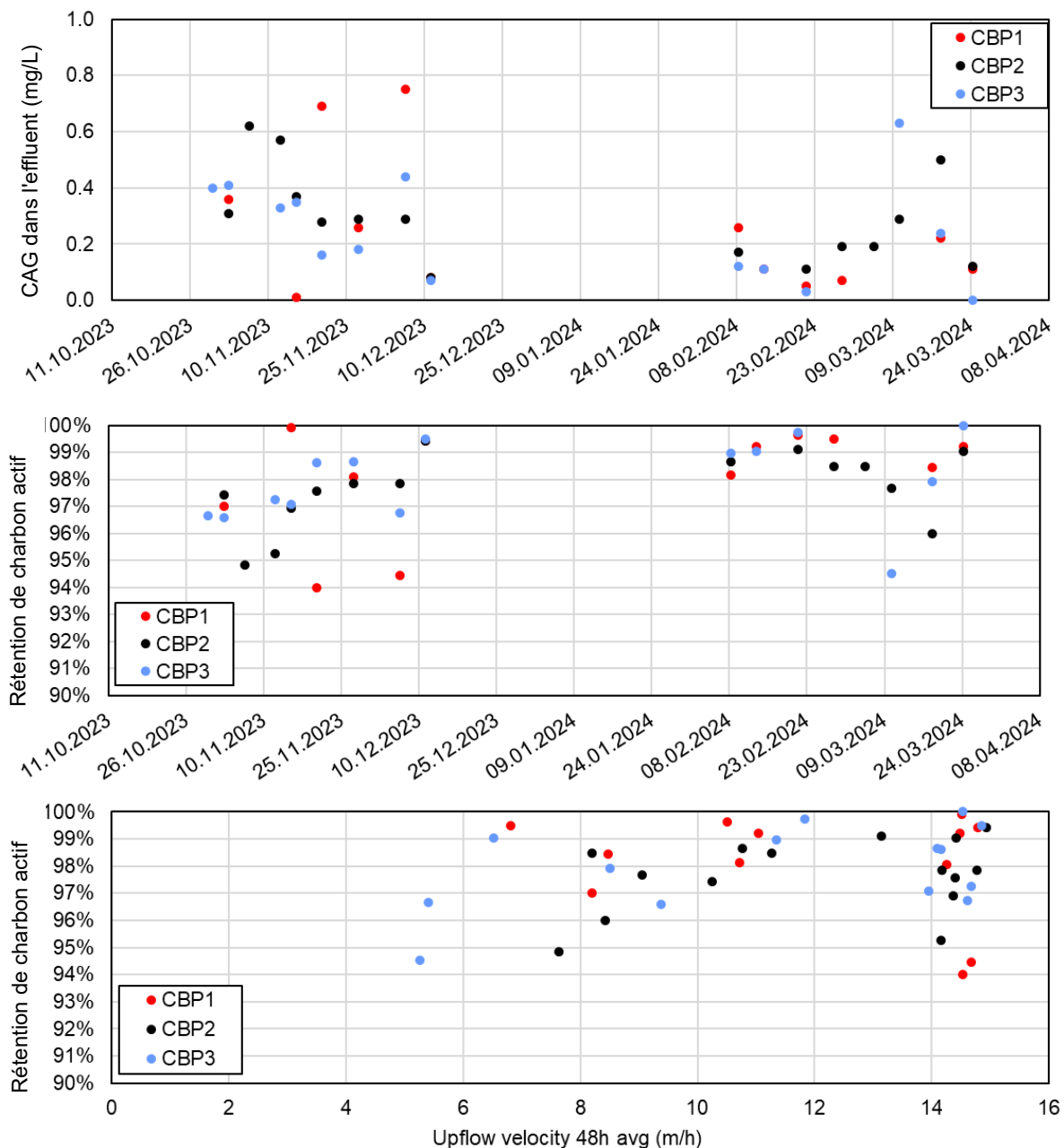


Figure 16 : Concentration en  $\mu$ CAG dans l'effluent de la STEP au fil du temps (en haut), rétention en  $\mu$ CAG dans les lits Carboplus au fil du temps (au milieu) et par rapport à la vitesse d'écoulement ascendant (en bas) et concentration en  $\mu$ CAG

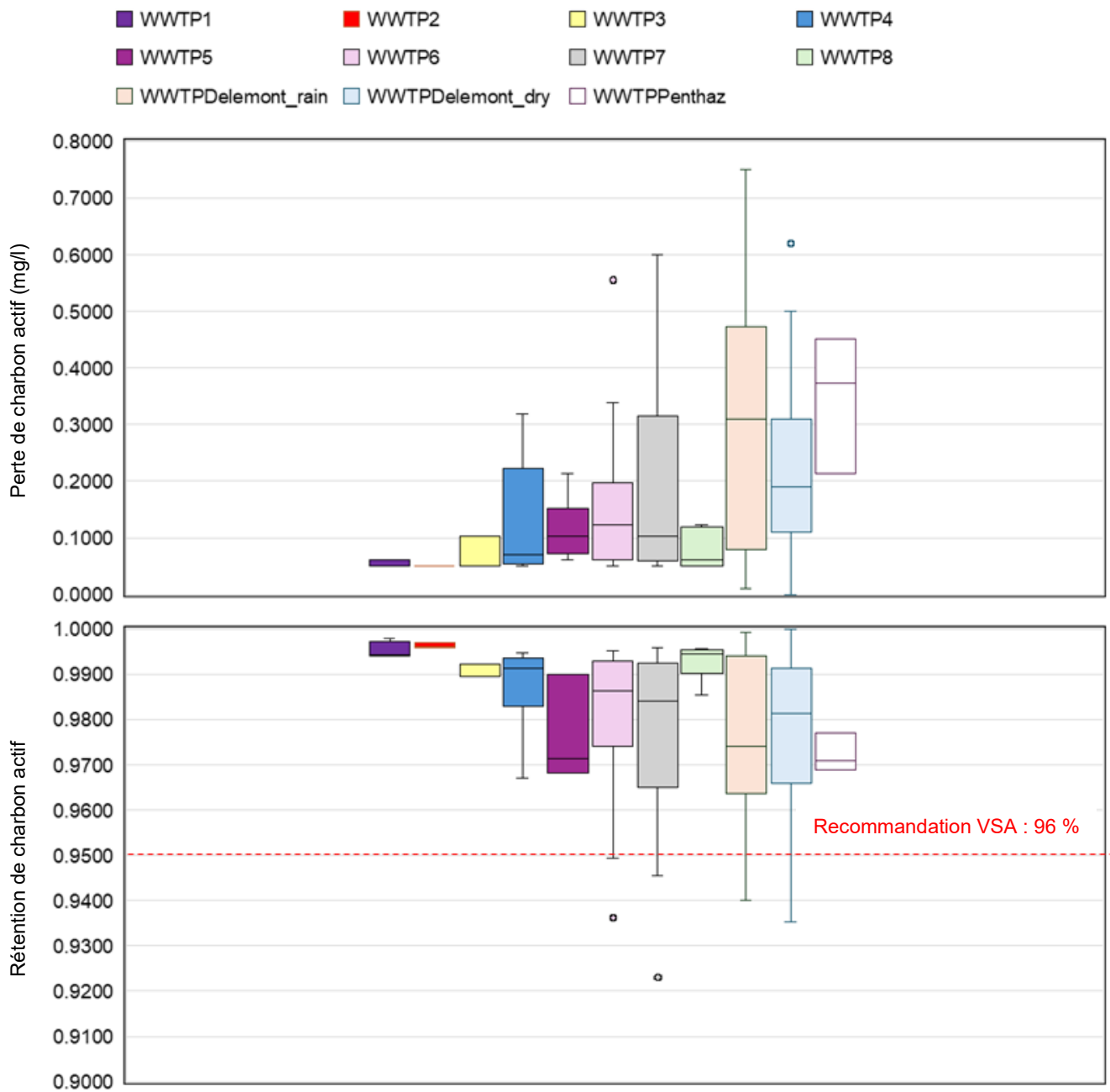


Figure 17 : Concentrations de charbon actif et rétention de charbon actif dans les STEP de Delémont, de Penthaz et d'autres STEP suisses utilisant du charbon actif en poudre.

### 3.9 Concentrations de diclofénac dans les effluents

Selon l'ordonnance suisse sur la protection des eaux, les concentrations de diclofénac dans les eaux de surface ne doivent pas dépasser 0,05 µg/l en moyenne sur une période de deux semaines. Les concentrations de diclofénac dans les effluents de la STEP de Delémont ont été mesurées principalement dans une fourchette de 0,05 à 0,20 µg/l (Figure 18 ). À la STEP de Delémont, le débit journalier moyen des eaux usées par temps sec se situe autour de 250 l/s. Le débit de la Birse en aval de la STEP de Delémont est d'environ 1 500 à 2 000 l/s lors de périodes de temps sec prolongées (Figure 19 ).

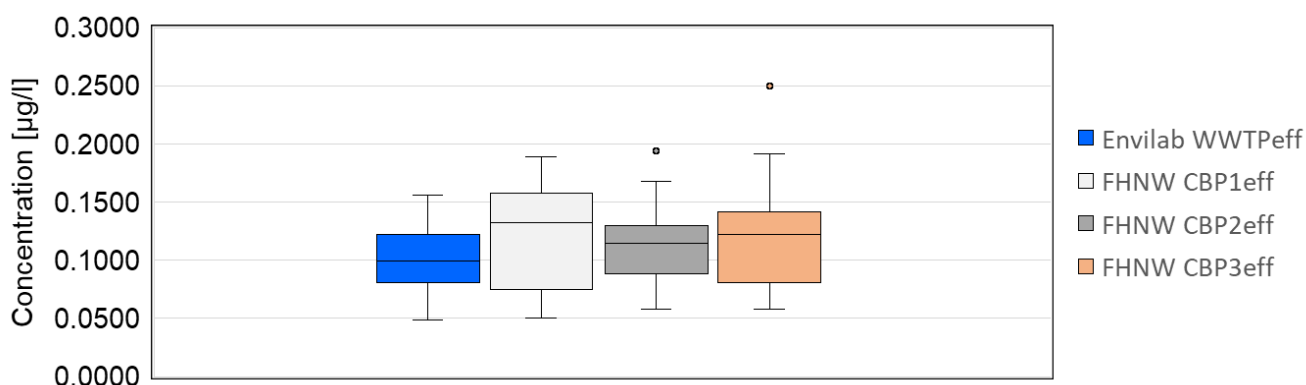


Figure 18 : Concentration de diclofénac dans les effluents de la STEP de Delémont mesurée par Envilab et la FHNW.

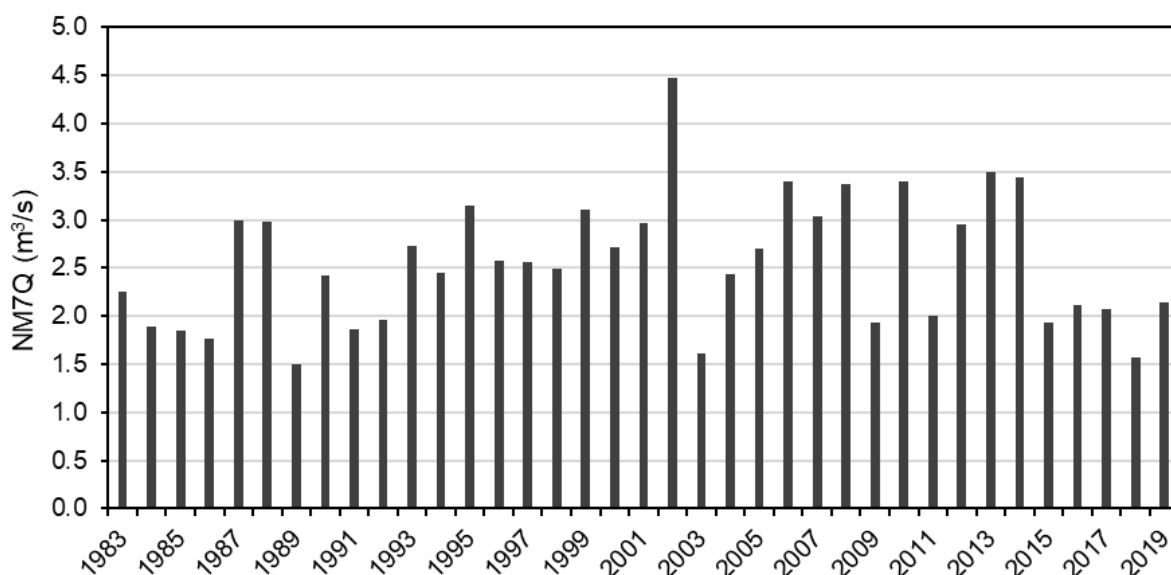


Figure 19 : NM7Q (débit moyen le plus bas sur 7 jours consécutifs au cours d'une année) dans la Birse à Soyhières, Bois du Treuil, pour la période 1983-2019 (Office fédéral de l'environnement OFEV, 2025) .

En considérant le pire des scénarios, une concentration de 0,25 µg/L de diclofénac est retenue, correspondant à la valeur maximale mesurée par la FHNW et Envilab AG. En supposant une concentration de 0,25 µg/L dans les effluents des STEP et un facteur de dilution de six dans la Birse lors de périodes

de temps sec prolongée, on estime que la concentration finale dans la rivière après dilution sera de 0,042 µg/L. Cette valeur est inférieure au seuil de 0,05 µg/L fixé par l'ordonnance suisse sur la protection des eaux. Toutefois, si l'on prend en compte les eaux usées provenant d'autres STEP situées le long de la Birse, la charge cumulative en eaux usées pourrait entraîner des concentrations plus élevées de diclofénac.

## 4 Conclusions

Cette étude a examiné le procédé CAG en lit fluidisé à grande échelle à la STEP de Delémont, en se concentrant sur le comportement du lit fluidisé, l'élimination des micropolluants et la rétention du charbon actif et des solides en suspension totaux. Les principales conclusions sont les suivantes :

### Efficacité de l'élimination des micropolluants

- Efficace par temps sec : le procédé élimine efficacement les micropolluants par temps sec, respectant ainsi les normes réglementaires suisses.
- Performances réduites par temps de pluie : l'efficacité de l'élimination diminue lors des épisodes pluvieux, probablement en raison d'une combinaison de temps de contact eau-carbone plus courts et de dilution des eaux usées. La contribution exacte de chaque facteur reste à déterminer.
- Insensibilité aux ajustements mineurs : les modifications à court terme du taux d'injection de charbon actif microgranulaire (µCAG) n'ont pas modifié de manière significative l'élimination des MPO. Cela s'explique probablement par le fait que la dose quotidienne est faible par rapport au volume important de charbon déjà présent dans le lit, dont le temps de séjour est de près d'un an.

### Charbon actif (µCAG) et rétention des solides

- Rétention élevée du charbon : le système retient très efficacement le charbon actif, avec des taux de rétention constamment supérieurs à 96 %, ce qui répond aux seuils suggérés par l'Association suisse des professionnels de la protection des eaux (VSA). Cette performance n'a pas été affectée négativement par l'augmentation des charges hydrauliques lors des épisodes pluvieux.
- Rétention variable des MES : la rétention MES provenant du clarificateur secondaire était irrégulière, avec une moyenne d'environ 50 %. Cela a parfois conduit à une accumulation de MES dans les lits de charbon, provoquant une augmentation de la hauteur des lits.

## Stratégies d'amélioration potentielles et comparaisons

- Amélioration des performances par temps de pluie : une stratégie potentielle a été identifiée pour améliorer l'élimination des MP :

Dosage de  $\mu$ CAG dans la phase principale de traitement biologique afin de créer un effet d'élimination en deux étapes.

*Remarque : une broyage du  $\mu$ CAG pour obtenir une granulométrie plus fine pourrait être nécessaire afin d'éviter la sédimentation dans les bassins de boues activées. La viabilité de cette stratégie nécessiterait des essais pilotes.*

- Analyse comparative : le procédé de la STEP de Delémont a montré une efficacité d'élimination des MPO légèrement inférieure à celle d'une installation similaire à la STEP de Penthaz. Les raisons de cette différence n'ont pas pu être identifiées dans le cadre de cette étude.

## Importance globale

- Cette étude fournit des informations précieuses sur la dynamique opérationnelle à grande échelle du procédé, comblant ainsi des lacunes de connaissances pour les ingénieurs et les exploitants de stations concernant le comportement des lits, les taux de rétention et de performances sous des conditions variables.

## 5 Références

- Albers, S., Baggenstos, M., Casazza, R., Le Goaziou, Y., Horisberger, M., Lambert, M., Margot, J., Rieck, T., Schneider, L., Fleiner, J., Morgado, A., Zöllig, H., Joss, A., Thomann, M., Liebich, C., Brander, A., Eugster, F., Tama, N., 2022. Fiche d'information - État actuel de la GAK dans le lit fluidisé.
- Office fédéral de l'environnement OFEV, 2025. Birse - Soyhières, Bois du Treuil [Document WWW]. URL <https://www.hydrodaten.admin.ch/en/seen-und-fluesse/stations/2478> (consulté le 28.04.25).
- Grelot, J., Horisberger, M., Casazza, R., 2021. Elimination des micropolluants par CAG en lit fluidisé. Aqua & Gas.
- Canton de Vaud, 2019. Micropolluants dans les stations d'épuration vaudoises.
- Mailler, R., Gasperi, J., Coquet, Y., Buleté, A., Vulliet, E., Deshayes, S., Zedek, S., Mirande-Bret, C., Eudes, V., Bressy, A., Caupos, E., Moilleron, R., Chebbo, G., Rocher, V., 2016. Élimination d'un large éventail de polluants émergents des rejets des stations d'épuration des eaux usées à l'aide de charbon actif à micrograins en lit fluidisé comme traitement tertiaire à grande échelle pilote. Science of The Total Environment 542, 983–996. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.153>
- Pulfer, M., Obrecht, J., Lutz, J.S., Tobias, B., Corvini, N., Hochstrat, R., Thomann, M., 2024. Analyse mathématique du traitement d'images du charbon actif (MIPA2C) dans les effluents des stations d'épuration des eaux usées.
- UVEK, 2016. Verordnung des UVEK [Document WWW]. URL <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2016/671/de> (consulté le 17/01/25).
- VSA, 2021. CAG en lit fluidisé à la STEP de Penthaz.
- VSA-Plattform Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen, 2025. Aktivkohle-Schlupf [document WWW]. VSA Micropoll. URL <https://micropoll.ch/verfahren/aktivkohle/aktivkohle-schlupf/> (consulté le 3.4.25).
- VSA-Plattform Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen, 2019. Aktueller Stand Beurteilung Aktivkohle Rückhalt.
- Zwickenpflug, B., Böhler, M., Sterkele, B., Joss, A., Siegrist, H., Traber, J., Gujer, W., Behl, M., Dorush, F., Hollender, J., Ternes, T., Fink, G., 2010. Einsatz von Pulveraktivkohle zur Elimination von Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser.