

TRAITEMENT DES MICRO-POLLUANTS À LA STEP

SÉPARATION DU CHARBON ACTIF EN POUDRE PAR ULTRAFILTRATION EN MODE FRONTAL

Le procédé CAP-UF(F) associe l'adsorption des micropolluants sur du charbon actif en poudre à la filtration membranaire en mode frontal. Les essais pilotes sur l'élimination des micropolluants dans les eaux usées menés de 2011 à 2013 à la STEP de Vidy (Lausanne) ont montré que ce procédé permet d'atteindre une qualité d'eau optimale en sortie des stations d'épuration avec des conditions d'exploitation satisfaisantes.

Anoÿs Magnet, Ville de Lausanne*

Jonas Margot, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

Marie Corbaz, Emmanuel Bonvin, Membratec SA

ZUSAMMENFASSUNG

ELIMINATION VON MIKROVERUNREINIGUNGEN: BEHANDLUNG VON ABWÄSSERN MIT PULVERAKTIVKOHLE UND ANSCHLIESSENDER ABTRENNUNG DURCH ULTRAFILTRATION

In den Jahren 2009 und 2010 wurden in der ARA Vidy (Lausanne) Pilottests zur Elimination von Mikroverunreinigung aus dem Abwasser durchgeführt. Die Tests haben die Effizienz der Pulveraktivkohle zur Entfernung der im Abwasser enthaltenen Mikroverunreinigungen bewiesen.

Im Weiteren wurden mehrere Verfahren zur Abtrennung der Aktivkohle vom aufbereiteten Wassers unter die Lupe genommen. Diese Untersuchungen zeigten, dass ein optimiertes Membransystem für die Abtrennung gut geeignet ist, viele Vorteile aufweist und auf ARA-Ebene umsetzbar ist.

Der Prozess PAK-UF kombiniert die Adsorption auf Aktivkohle (PAK) mit der Ultrafiltration im Frontalmodus (UF(F)) zur Aufbereitung des Trinkwassers. Auf diese Weise kann nicht nur eine erhebliche Reduktion der Mikroverunreinigungen (> 80%), eine komplette Filtration der Schwebstoffe und des gebundenen Phosphors, sondern auch die Entfernung der Bakterien und Viren erreicht werden.

Die voraussichtlichen Kosten des kombinierten Prozesses PAK-UF(F) betragen rund 0,17 CHF pro aufbereitetem Kubikmeter Wasser.

ELIMINATION DES MICROPOLLUANTS - CONTEXTE

En 2009-2010, des essais pilotes sur le traitement des micropolluants ont été réalisés à la STEP de Vidy par la Ville de Lausanne, avec le soutien du canton de Vaud et de l'Office fédéral de l'environnement, dans le cadre du projet «Stratégie Micropoll». Les résultats et les conditions d'exploitation et de mesure de ces essais sont détaillés dans le rapport final [1] et dans un article paru dans le GWA [2].

La Ville de Lausanne a ensuite réalisé des essais complémentaires de 2011 à 2013 pour optimiser le fonctionnement d'un des procédés étudiés. Cet article présente les motivations, le dispositif expérimental ainsi les résultats de ces essais complémentaires.

LES TECHNOLOGIES D'ÉLIMINATION

Deux traitements avancés des micropolluants, essentiellement des produits pharmaceutiques et pesticides présents dans les eaux usées, ont été étudiés en 2009-2010:

- Oxydation par ozonation suivie d'une filtration sur sable (Ozone-FS),
- Adsorption sur charbon actif en poudre (CAP) suivi d'une ultrafiltration membranaire (UF) fonctionnant en mode tangen-

* Contact: anoys.magnet@lausanne.ch

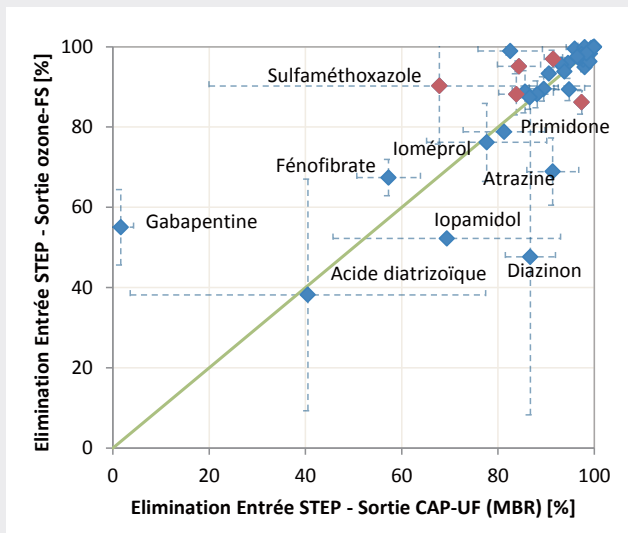


Fig. 1 Comparaison de l'abattement de 41 substances entre l'entrée de la STEP et la sortie soit de l'Ozone-FS, soit du CAP-UF, (6,7 mg O₃/l, 20 mg CAP/l)

Vergleich der Reduktion von 41 Stoffen zwischen Ein- und Auslauf der ARA, entweder durch Ozon-Sandfiltration (SF) oder durch PAK-UF (6,7 mg O₃/l, 20 mg PAK/l)

tiel avec recirculation, de type membrane bioreactor (MBR; nommé CAP-UF dans [1] et [2], et dénommé CAP-UF(MBR) ci-après).

Les essais pilotes ont montré que les taux d'élimination moyens sont similaires pour les deux traitements testés [1]. Une réduction moyenne des micropolluants (entre l'entrée de la STEP et la sortie du traitement avancé) de 88% est observée pour le CAP-UF(MBR) (20 mg CAP/l) et de 89% pour l'Ozone-FS (6,7 mg O₃/l). Certaines substances sont cependant mieux éliminées par l'un ou l'autre traitement, comme le montre la figure 1.

CAP-UF(MBR)

En outre, l'étude a montré que le procédé CAP-UF(MBR) (cf. fig. 2) permet d'abattre avec satisfaction les micropolluants tout

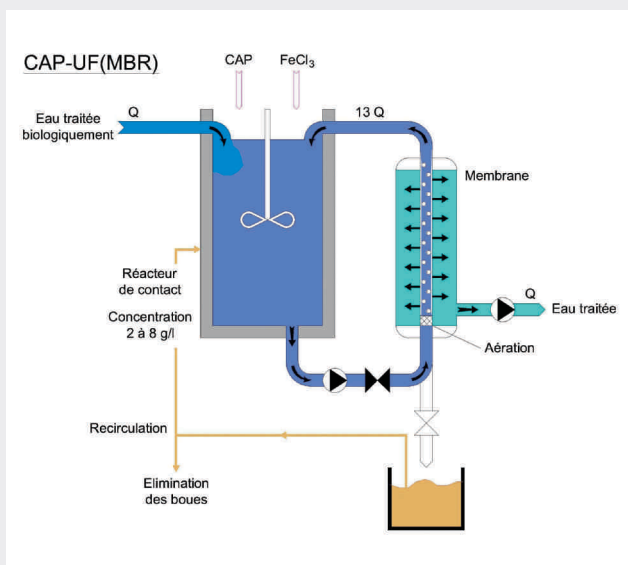


Fig. 2 Schéma simplifié du procédé CAP-UF(MBR)
Vereinfachtes Schema des Prozesses PAK-UF(MBR)

en améliorant fortement la qualité globale de l'effluent. Ainsi le CAP permet d'éliminer les micropolluants et de réduire significativement le carbone organique dissous (COD) tandis que l'UF permet d'éliminer les matières en suspension (MES), les bactéries et les virus ainsi que de réduire fortement le phosphore (précipité grâce à l'ajout de chlorure ferrique).

Cependant, les conditions d'exploitation (flux membranaire faible d'environ 30l/h·m² et consommation énergétique très importante d'environ 0,9 kWh/m³) ne permettent pas d'envisager l'industrialisation du procédé CAP-UF(MBR). Le principal poste de consommation énergétique de ce procédé CAP-UF(MBR) (environ 70%) concerne l'aération et la recirculation (13 fois le débit filtré), éléments nécessaires au fonctionnement de la membrane car les concentrations de MES sont très élevées (se montant à 2 à 8 g/l de CAP plus MES de sortie du traitement biologique) à cause de la filtration tangentielle et de la recirculation du CAP.

CAP-FS

Le procédé de séparation du CAP dans un filtre à sable (CAP-FS; fig. 3) a été étudié en parallèle au CAP-UF(MBR). Ce procédé fonctionne sans recirculation du CAP. Ainsi, dans le réacteur, la concentration du CAP est identique au dosage appliqué (10 à 20 mg/l) et la concentration totale en MES est comprise entre 20 et 50 mg/l.

Le CAP retenu s'accumule dans le filtre à sable. Avec un rétrolavage toutes les 24 heures, le CAP ainsi concentré est en contact avec l'eau à traiter et peut donc continuer à adsorber les substances (tant que la saturation n'est pas atteinte).

Le tableau 1 résume les éliminations moyennes des micropolluants observées pour le procédé CAP-FS. Pour un même dosage de CAP, l'élimination des micropolluants est similaire pour les procédés CAP-FS et CAP-UF(MBR).

Par conséquent, la concentration du CAP dans le réacteur de contact n'est pas nécessaire pour atteindre l'objectif fixé d'élimination de micropolluants (Projet de modification de l'ordonnance fédérale de protection des eaux (OEaux): > 80%). Malgré des coûts et une efficacité intéressante, le procédé CAP-FS ne permet pas de garantir une rétention complète du

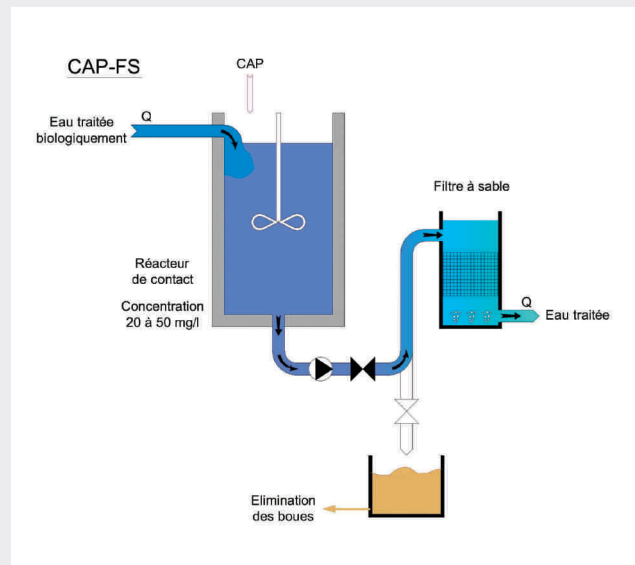


Fig. 3 Schéma simplifié du procédé CAP-FS
Vereinfachtes Schema des Prozesses PAK-SF

	Dosage CAP [mg/l]	Temps de contact dans le réacteur [min]	Abattement moyen entre l'entrée de la STEP et la sortie du traitement CAP-FS [%]	
			MP analysés (21 substances)	5 substances de l'OEau ^(a) [%]
13.07.2010	10	env. 90	84,8	90,1
28.09.2010	10	env. 90	83,8	79,0
05.10.2010	30	env. 90	92,8	96,8
12.10.2010	20	env. 90	89,3	91,1

^(a) Les 5 substances envisagées dans le projet de modification de l'OEau: Benzotriazole, Carbamazépine, Diclofénac, Mécoprop et Sulfaméthoxazole

Tab. 1 Élimination des micropolluants par la filière CAP-FS

Entfernung der Mikroverunreinigungen durch den PAK-SF-Prozess

CAP contaminé. Environ 3 mg MES/l ont été observés en sortie du filtre mais la proportion de CAP n'a pas été déterminée. Les risques de fuite du CAP chargé de polluants en cas de dysfonctionnement du filtre sont également plus importants qu'avec la filtration membranaire. De plus, contrairement aux membranes UF, la filtration sur sable ne permet pas une hygiénisation de l'effluent.

PROCÉDÉ CAP-UF(F)

MOTIVATION

Les expériences exposées précédemment ont montré que:

- Le procédé CAP-UF(MBR) permet un abattement adéquat des micropolluants et une élimination des matières en suspension, des bactéries et des virus. Il présente toutefois une consommation énergétique excessive liée à une forte recirculation, à une aération conséquente et à une exploitation à un faible flux transmembranaire rendues nécessaires du fait de la concentration élevée de CAP et de MES.
- Le procédé CAP-FS élimine à satisfaction les micropolluants sans nécessiter une concentration du CAP mais ne permet pas de garantir une rétention complète du CAP.

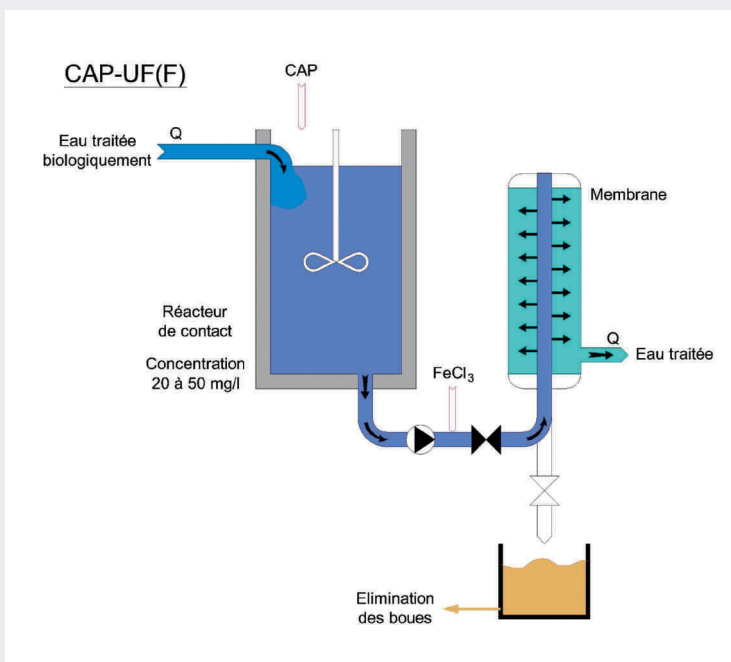


Fig. 4 Schéma simplifié du procédé CAP-UF(F)

Vereinfachtes Prozessschema PAK-UF(F)

Ces résultats ont amené le développement d'un autre procédé membranaire, le procédé CAP-UF(F), afin de minimiser la consommation énergétique.

DESCRIPTION DU PROCÉDÉ

Le procédé CAP-UF(F) est similaire aux procédés membranaires exploités dans le traitement de l'eau potable. Le CAP (environ 15 mg/l) est ajouté à l'effluent à traiter dans un réacteur de contact durant environ 60 minutes. Le CAP y est maintenu en suspension à l'aide d'un agitateur. L'effluent, dont la concentration totale en MES est de 20 à 50 mg/l, subit une préfiltration puis une micro-coagulation en ligne (de 0 à 3 mg Fe/l) avant d'être dirigé vers l'unité de filtration membranaire. La filtration est effectuée en mode frontal, d'où la dénomination «UF(F)», donc sans retour des MES et du CAP vers le réacteur de contact. Le procédé CAP-UF(F) est présenté sur la figure 4.

CARACTÉRISTIQUES DU PILOTE UF(F)

L'unité pilote de filtration membranaire exploitée dans le cadre des essais CAP-UF(F) est présentée en figure 5; ses principales caractéristiques sont détaillées dans le tableau 2.

Ce procédé permet de s'affranchir de l'aération et de la forte recirculation du procédé CAP-UF(MBR). La faible charge totale de MES autorise en outre une exploitation de longue durée du procédé CAP-UF(F), et ce à des flux transmembranaires sensiblement plus élevés que ceux observés sur le CAP-UF(MBR). La consommation énergétique du pilote CAP-UF(F) (cf. tab. 3) est ainsi drastiquement plus faible (de l'ordre d'un facteur 5) que celle du pilote CAP-UF(MBR).



Fig. 5 Photographie du pilote d'ultrafiltration UF(F)

Ultrafiltrationspilotanlage UF(F)

Débit de production	35 à 80 l/min
Préfiltration	300 µm
Surface membranaire totale	75 m ²
Seuil de coupure	200 kDa
Diamètre interne des fibres	0,8 mm
Type de filtration	IN-OUT
Matériau de la membrane	PES (Polyethersulphone)

Tab. 2 Caractéristiques du pilote d'ultrafiltration UF(F)
Eigenschaften der Ultrafiltrationspilotanlage UF(F)

FONCTIONNEMENT DU PILOTE UF(F)

Le pilote UF(F) est entièrement automatisé. Il fonctionne selon une séquence cyclique des différents modes d'exploitation (filtration, rétrolavage, choc au chlore, nettoyage chimique).

Filtration

La pompe d'alimentation fournit l'effluent à traiter au préfiltre et aux modules d'ultrafiltration. Le filtrat (eau filtrée par les membranes) est évacué vers l'exutoire de la STEP, alors que les impuretés indésirables restent prisonnières des membranes. La filtration est purement frontale.

Le préfiltre, un tamis cylindrique en inox d'ouverture 300 µm pour éviter le bouchage des membranes, est automatiquement rétrolavé en fonction de la perte de charge mesurée. Le débit de production est maintenu constant durant le cycle de filtration. La perméabilité (état de propreté) des membranes est mesurée de façon continue à l'aide du débit effectif normalisé par la perte de charge.

Rétrolavage

A intervalles réguliers (environ 20 minutes), la pompe de rétrolavage repousse un volume de filtrat (environ 10% du volume traité) à contresens à travers les membranes, sans addition de réactif. Les impuretés concentrées sur les membranes sont ainsi évacuées dans le concentrât (eaux sales) vers le traitement biologique amont. L'eau de rétrolavage est contenue dans un réservoir d'une capacité d'environ 150 litres intégré au pilote.

Choc au chlore

Activée deux à trois fois par jour, une phase de contact au chlore de 15 à 20 minutes, en boucle fermée, limite la présence d'un biofilm colmatant sur la membrane. Cette étape est suivie d'un long rétrolavage avant que l'unité ne revienne en mode de filtration.

Nettoyage chimique

Le nettoyage chimique des membranes permet de dissoudre les impuretés colmatant les membranes. Le nettoyage chimique se fait par ajout d'un produit chimique (soude, divers acides ou solutions de nettoyage) dans une eau maintenue à 40 °C. Ce nettoyage est réalisé (tous les deux à trois mois en moyenne) lorsque la perméabilité des membranes n'est plus suffisante (< 100 l/h·m²·bar typiquement).

Instrumentation et commande

Le pilote dispose de l'appareillage nécessaire pour enregistrer les paramètres suivants: débit de filtration, perméabilité des

membranes, température de l'eau, pressions en amont et aval du préfiltre, pressions en amont et aval des membranes et consommation électrique. Le fonctionnement du pilote d'ultrafiltration est ainsi entièrement automatisé.

EXPLOITATION DU PROCÉDÉ UF(F)

Les essais dans la configuration CAP-UF(F) ont démarré en octobre 2011 par une phase d'optimisation de cinq mois. Le flux a été progressivement augmenté, passant de 16 à 40 l/h·m². Les doses de CAP ont été variées (de 10 mg/l à 20 mg/l), ainsi que plusieurs paramètres du pilote (pertes en eau, choc au chlore). Dès février 2012, la micro-coagulation à l'aide de chlorure ferrique a été activée afin de favoriser le maintien de la perméabilité.

Les essais se sont poursuivis jusqu'à mi-août 2012, avec une augmentation graduelle du flux de 40 à 95 l/h·m², suivie par une exploitation stable à 90 l/h·m². Le flux et la perméabilité durant cette période sont illustrés sur la figure 6. Cette figure montre la stabilité du procédé, aucun nettoyage chimique n'a été nécessaire durant les trois mois d'exploitation.

Afin de tester des flux supérieurs à 68 l/h·m² sans changer de pompe d'alimentation du pilote, la surface membranaire a été réduite à mi-mai 2012 de 75 m² à 50 m².

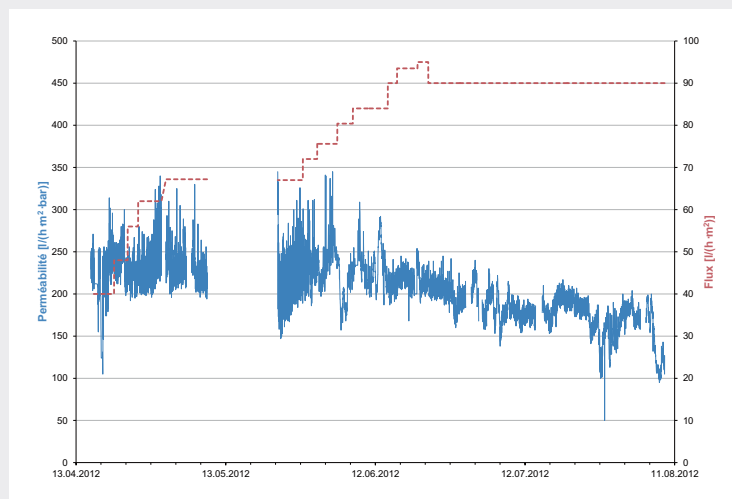


Fig. 6 Flux membranaire et perméabilité durant le printemps et l'été 2012
Transmembranfluss und Permeabilität im Frühjahr und Sommer 2012

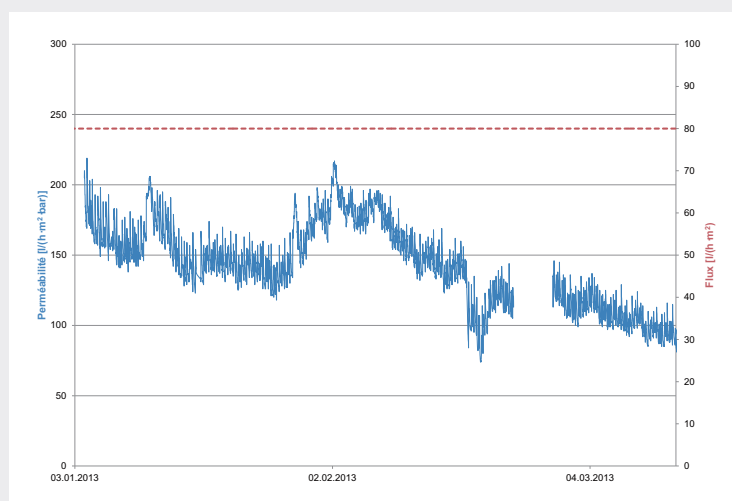


Fig. 7 Flux membranaire et perméabilité durant l'hiver 2013
Transmembranfluss und Permeabilität im Winter 2013

Afin de démontrer la stabilité d'exploitation du pilote CAP-UF(F) dans des conditions hivernales, le pilote a été exploité à un flux de 80 l/h-m² de janvier à mars 2013. Durant cette période, la température de l'eau était de 12 à 15 °C (au lieu de 18 à 22 °C pendant la période précédente), et l'exploitation s'est déroulée sans problème particulier comme illustré sur la *figure 7*. L'exploitation du procédé CAP-UF(F) durant la période d'octobre 2011 à avril 2013 a démontré que le maintien de flux membranaires élevés (de l'ordre de 80 à 95 l/h-m²) est possible, été comme hiver, pour autant que la filière de traitement amont fonctionne correctement.

ASPECTS ÉNERGÉTIQUES ET ÉCONOMIQUES DU CAP-UF(F)

La consommation électrique spécifique a été mesurée en continu durant toute l'exploitation du pilote CAP-UF(F). La plus faible valeur observée sur une période de 48 heures est de 0,12 kWh/m³ traité, pour un flux de 67,2 l/h-m². Après la réduction de surface membranaire liée à la nécessité de tester des valeurs supérieures de flux, la pompe d'alimentation (le plus important consommateur) a fonctionné à des fréquences, et donc à des rendements, plus faibles. La consommation électrique moyenne durant la phase stable des essais s'est montée à 0,14 kWh/m³ traité.

Suite à l'amélioration sensible des performances énergétiques, la viabilité économique du procédé CAP-UF(F) à une échelle industrielle mérite d'être évaluée. Le *tableau 3* présente les coûts d'investissement et les coûts d'exploitation de ce procédé calculés par extrapolation des flux et des consommations (électricité, réactifs) observés lors du fonctionnement du pilote CAP-UF(F), avec comme hypothèse un débit de pointe de 1 m³/s pour un débit moyen de 0,5 m³/s. La consommation énergétique est déterminée avec des équipements (pompes) adaptés aux débits à traiter. Des périodes de 5, 15 et 30 ans sont considérées pour l'amortissement respectivement des membranes, des équipements électromécaniques et du second œuvre, et des ouvrages de génie civil; et ce à un taux d'intérêt de 4%. Le coût total est estimé à 0,17 CHF/m³ traité, soit du même ordre de grandeur que le coût estimé pour d'autres traitements avancés (0,09-0,20 CHF/m³ pour l'ozonation avec filtration et l'adsorption sur CAP avec filtration) [3].

ÉLIMINATION DES MICROPOLLUANTS

Le *tableau 4* résume les abattements des micropolluants mesurés entre l'entrée de la STEP et la sortie du pilote CAP-UF(F). Le traitement en amont du pilote correspond au traitement décrit dans [1] et [2]. Le détail d'abattement par substance est présenté, pour la campagne du 17 avril 2012, dans la *figure 8*.

Les résultats confirment que le procédé CAP-UF(F) atteint l'abattement visé (80%) des micropolluants avec des dosages de CAP d'environ 15 mg/l. Pour la même dose de CAP, l'élimination moyenne des cinq substances indicatrices (projet de modification de l'OEaux) semble légèrement plus faible avec ce procédé qu'avec le procédé CAP-UF(MBR) ou le procédé CAP-FS. Cette tendance observée sur quelques campagnes (pour des eaux différentes) peut être attribuée au temps de séjour du CAP inférieur à deux heures dans l'installation CAP-UF(F) (saturation éventuellement non atteinte). De

plus, un dosage de CAP de l'ordre de 20 à 30 mg/l peut être envisagé, par exemple en cas de pic de pollution, sans péjorer le fonctionnement de l'installation membranaire.

Par ailleurs, l'influence sur l'élimination des micropolluants de la recirculation du charbon actif usagé (concentrat de la filtration membranaire) vers le traitement biologique n'a pas été évaluée. La différence très importante des débits traités (environ 60 l/s pour le traitement biologique et de 1 l/s pour le pilote CAP-UF(F)) ne permettait pas de la mesurer.

CONCLUSION

Cette étude montre que le procédé CAP-UF(F) est techniquement et financièrement réalisable à l'échelle industrielle. Ce procédé permet non seulement de répondre aux exigences définies dans le projet de modification de l'OEaux, mais aussi d'améliorer fortement la qualité des eaux rejetées (MES, COD, phosphore, bactéries, virus).

Critères	Pilote UF(F)	CAP-UF(F) à l'échelle industrielle (extrapolation)
Consommation électrique	0,14 kWh/m ³ traité [seulement UF]	0,10 kWh/m ³ traité
Coûts d'exploitation ^(a)		0,08 CHF/m ³ traité
Frais d'investissement ^(b)		0,09 CHF/m ³ traité
Volume des installations		Env. 15 000 m ³ /(m ³ traité/s)

^(a) Basé sur des prix locaux: 0.2 CHF/kWh, 2.4 CHF/kg CAP [dosage de 15 mg CAP/l], 0.2 CHF/kg FeCl₃ (40%), 80 CHF/h pour le pers, hors coût du traitement des eaux sales (10% du volume traité), m³ traité correspond au volume envoyé vers l'exutoire de la STEP.

^(b) Basé sur un investissement de 8.5 MCHF pour les équipements électromécaniques (y compris les membranes) et de 6.5 MCHF pour les ouvrages de génie civil et le second œuvre; l'amortissement est calculé comme suit: génie civil sur 30 ans, équipements électromécaniques (hors membranes) et second œuvre sur 15 ans, membranes sur 5 ans, intérêts de 4%. Ces coûts ont été déterminés pour une installation traitant en moyenne 0.5 m³/s (capacité maximum de 1 m³/s).

Tab. 3 Aspects économiques du procédé CAP-UF(F)
Finanzielle Aspekte des Prozesses PAK-UF(F)

	Dosage CAP [mg/l]	Temps de contact [min]	Abattement moyen entre l'entrée de la STEP et la sortie du traitement CAP-UF(F) [%]	
			MP analysés (49 à 54 substances)	5 substances de l'OEaux ^(a) [%]
23.11.2010 ^(b)	15	env. 60	>82,5 ^(c)	86,6
13.03.2012	7	env. 30	>62	42 ^(d)
20.03.2012	10	env. 30	>76	64
27.03.2012	10	env. 30	>85	76 ^(d)
17.04.2012	15	env. 90	>87	87 ^(d)
04.07.2012	13	env. 90	>78	>78
10.07.2012 ^(e)	13	env. 90	>78	73 ^(d)

^(a) Les 5 substances envisagées dans le projet de modification de l'OEaux: Benzotriazole, Carbamazépine, Diclofénac, Mécoprop et Sulfaméthoxazole

^(b) avec de l'eau sortant d'une biologie forte charge non nitrifiante

^(c) sur 20 substances

^(d) le Mecoprop n'a pas été détecté en entrée, l'abattement de ce produit n'est donc pas calculé

^(e) Prélèveur d'entrée de STEP hors service, le prélèvement a été effectué en sortie du traitement primaire

Tab. 4 Données d'exploitation du pilote CAP-UF(F)
Betriebsdaten der Pilotanlage PAK-UF(F)

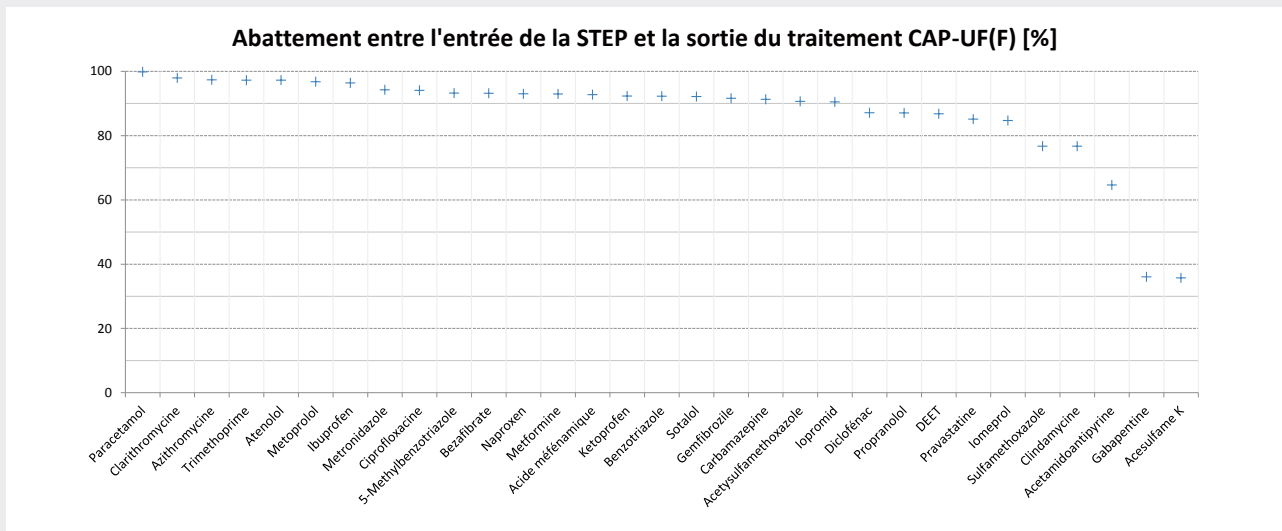


Fig. 8 Abatement des 31 substances détectées entre l'entrée de la STEP et la sortie du traitement CAP-UF(F) le 17 avril 2012
 Reduktion der 31 identifizierten Stoffe zwischen Einlauf der ARA und Auslauf des Prozesses PAK-UF(F) am 17. April 2012

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Margot, J.; Magnet, A.; Thonney, D.; Chèvre, N.; de Alencastro, F.; Rossi, L. (2011): *Traitement des micropolluants dans les eaux usées – Rapport final sur les essais pilotes à la STEP de Vidy (Lausanne)*. Ed. Ville de Lausanne
- [2] Margot, J.; Magnet, A. (2011): *Elimination des micropolluants dans les eaux usées – Essais pilotes à la station d'épuration de Lausanne, gwa 7/2011: 487-493*
- [3] Abegglen, C.; Siegrist, H. (2012): *Micropolluants dans les eaux usées urbaines*.

INFORMATIONS SUPPLÉMENTAIRES

Retrouvez toutes les publications sur les essais pilotes sur www.lausanne.ch/micropolluants

Etapas de traitement supplémentaire dans les stations d'épuration. Office fédéral de l'environnement, Berne, Connaissance de l'environnement 1214, 87 p.




Holen Sie sich Ihr Geld zurück

Klärschlamm effizient eindicken und entwässern mit FLOTTWEG DECANter
- trockener geht's nicht!



Flottweg SE • Deutschland • Tel.: +49 8741 301-0 • mail@flottweg.com • www.flottweg.com
 Picatech Huber AG • Schweiz • Tel.: +41 41 349 68 68 • info@picatech.ch • www.picatech.ch

