

Concepts de surveillance de l'efficacité d'épuration des étapes de traitement supplémentaires permettant l'élimination des micropolluants

Rédaction P. Wunderlin (VSA)

Suivi technique D. Rensch (direction de projet), Ch. Abegglen (VSA), D. Dominguez (anciennement à l'OED de Berne, désormais à l'OFEV), Ch. Egli (AV Altenrhein), Y. Le Goaziou (anciennement chez Alpha WT, désormais chez BG), M. Schachtler (STEP de Neugut), D. Pfund (ERZ), D. Urfer (RWB), D. Thonney (SIGE), A. Wittmer (Eawag), P. Wunderlin (VSA)

La présente compilation de méthodes et concepts, qui pourraient être utilisés pour surveiller en continu l'efficacité d'épuration des étapes de traitement supplémentaires destinées à éliminer les micropolluants dans les stations d'épuration communales, montre que la mesure d'absorbance UV à 254 nm constitue un paramètre approprié pour remplacer l'analyse des composés traces.

Parallèlement à la mesure périodique des composés traces (imposée par des exigences légales), il est donc recommandé de mesurer le signal d'absorbance UV à 254 nm en entrée et sortie de l'étape d'élimination des composés traces ($\Delta UV = (UV_{in} - UV_{out})/UV_{in}$) afin de surveiller l'efficacité d'épuration. Pour ce faire, une mesure en ligne peut être utilisée (les sondes sont disponibles sur le marché). Mais il est également possible d'obtenir des informations sur l'élimination des composés traces en effectuant des mesures UV périodiques d'échantillons composites en laboratoire.

Sommaire

1. Introduction	2
2. Absorbance UV à 254nm	2
3. Electron Donating Capacity (EDC).....	7
4. Fluorescence	8
5. Substance organique (COD / DCO)	10
6. Autres concepts	11
7. Conclusion générale.....	14
8. Collecte centralisée et stockage des données	14
9. Bibliographie	14

1) Introduction

Le contrôle de l'efficacité d'épuration et la surveillance de l'exploitation constituent des aspects importants de la mise en œuvre et de l'exploitation d'étapes d'épuration supplémentaires servant à éliminer les composés traces (appelées ci-après étapes MP). Idéalement, il pourrait être possible de vérifier, à l'aide de sondes en ligne robustes ou de systèmes de test faciles à utiliser, si l'étape MP respecte le taux d'épuration fixé par la loi (80% par rapport aux eaux polluées brutes, Ordonnance sur la protection des eaux, OEaux, RS 814.20).

Ces procédés de mesure ont déjà été utilisés dans le contexte de l'élimination des composés traces dans les stations d'épuration. Mais certaines questions demeurent encore ouvertes, comme: (i) selon quels paramètres l'exploitation de l'installation peut-elle être surveillée?, (ii) des essais à grande échelle ou l'exploitation d'installations semblables peuvent-ils fournir des expériences sur des concepts de mesure et de réglementation de ce type?, (iii) quelles méthodes sont pertinentes et prometteuses? ou (iv) dans quels domaines est-il nécessaire de promouvoir la recherche?

Le présent document dresse un état des lieux des concepts actuellement disponibles et propose une évaluation de leur potentiel. Les problématiques et questions ouvertes sont par ailleurs identifiées, afin de pouvoir analyser ces aspects de manière ciblée dans de futurs projets.

Les procédés suivants sont exposés dans le détail: **(i) absorbance UV, (ii) electron donating capacity (EDC), (iii) fluorescence, (iv) COD/DCO**. Le principe de ces concepts est toujours le même: utiliser un paramètre cumulatif ou une alternative à l'analyse des composés traces, qui serait plus simple et économique à mesurer.

Parallèlement aux procédés susmentionnés, **d'autres concepts envisageables (v)** sont représentés. Certes, ils ne se prêtent pas (encore) directement à la surveillance de l'exploitation, mais peuvent compléter les procédés susmentionnés (p. ex. prise en compte des paramètres d'exploitation conventionnels) et se révéler intéressants dans le futur (p. ex. sondes en ligne écotoxicologiques), ou convenir à la surveillance des aspects liés à la sécurité (p. ex. surveillance de la concentration d'ozone dissous dans l'effluent ou dans l'air sortant).

2) Absorbance UV à 254 nm

Principe de mesure. Des substances organiques (COD) possédant des propriétés spécifiques sont responsables de l'absorbance des rayons UV à 254 nm dans les eaux usées épurées. Ainsi, les substances organiques comportant des groupes fonctionnels, c'est-à-dire des densités d'électrons élevées (p. ex. molécules aromatiques), sont plus particulièrement détectées. Ces substances sont également bien oxydées par l'ozone (Chon et al., 2015). Les substances possédant ces propriétés semblent également très bien adsorbées par le charbon actif (Altmann et al., 2015).

D'une manière générale, les structures moléculaires (aromatiques) sont détruites ou éliminées de l'eau lors de l'élimination des micropolluants (soit par oxydation ou sorption), induisant également une diminution de l'absorbance UV. La mesure continue du signal UV en entrée et en sortie de l'étape MP ainsi que la détermination de la diminution de l'absorbance peuvent donc permettre de surveiller assez simplement l'efficacité d'épuration en ligne (représentation schématique dans la figure 1). La diminution de l'absorbance engendrée par l'étape MP dépend du dosage d'ozone (fig. 2.), du dosage de charbon actif ainsi que de la durée d'utilisation du filtre CAG (fig. 3). Dans la figure 3, les mesures UV n'ont pas été effectuées en ligne, mais analysées en

laboratoire à l'aide d'échantillons composites. Il apparaît que la mesure UV réalisée sur des échantillons composites en laboratoire est une alternative prometteuse par rapport à la mesure en ligne. Par ailleurs, les mesures en laboratoire peuvent être utilisées comme mesures de comparaison pour la sonde en ligne.

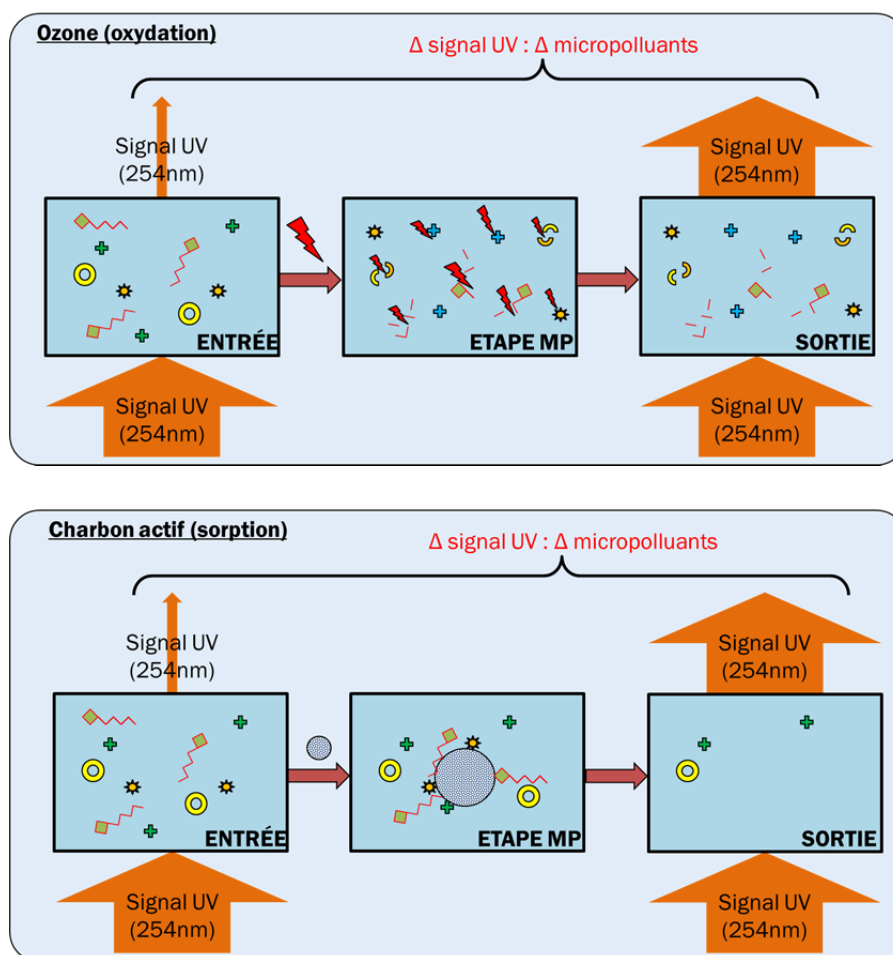


Figure 1. Représentation schématique du concept de mesure d'absorbance UV pour l'ozonation (en haut) et les applications au charbon actif (en bas). Pour une meilleure compréhension: avant le traitement MP (c'est-à-dire à la sortie du décanteur secondaire), l'absorbance à 254 nm est élevée (seule une partie de la lumière irradiée passe à travers la masse d'eau). Après le traitement (c'est-à-dire à la sortie de l'étape MP), lorsque les composés traces ont été éliminés, l'absorbance est basse (une grande partie de la lumière irradiée passe à travers la masse d'eau).

Lors de l'ozonation, la mesure UV (ΔUV) présente un avantage supplémentaire: des concentrations de nitrite élevées sont indirectement détectées en raison d'une diminution plus faible de l'absorbance UV lors de l'étape MP (en effet, le nitrite consomme très rapidement l'ozone présent et affecte l'oxydation des substances organiques présentes, ce qui se traduit par une diminution plus faible de l'absorbance UV; Wittmer et al., 2013).

Expériences. La mesure de l'absorbance UV a déjà été utilisée dans certains projets de recherche (p. ex. Fleiner, 2015, Wittmer et al., 2015, Altmann et al., 2015; Zietzschmann et al., 2014, Gerrity et al., 2012), aussi bien en rapport avec l'ozonation qu'avec le charbon actif. Une corrélation entre la diminution des composés traces et celle de l'absorbance UV a été mise en

évidence. Ce concept a également déjà été utilisé dans certaines réalisations à l'échelle industrielle (p. ex. étapes au CAP dans le Bade-Wurtemberg, ozonation dans la STEP de Neugut (Schachtler et Hubaux, 2016), étape au CAP dans la STEP de Bachwis à Herisau, ozonation à Bad-Sassendorf). Ce procédé de mesure peut donc être considéré comme fiable et entre-temps bien testé et éprouvé.

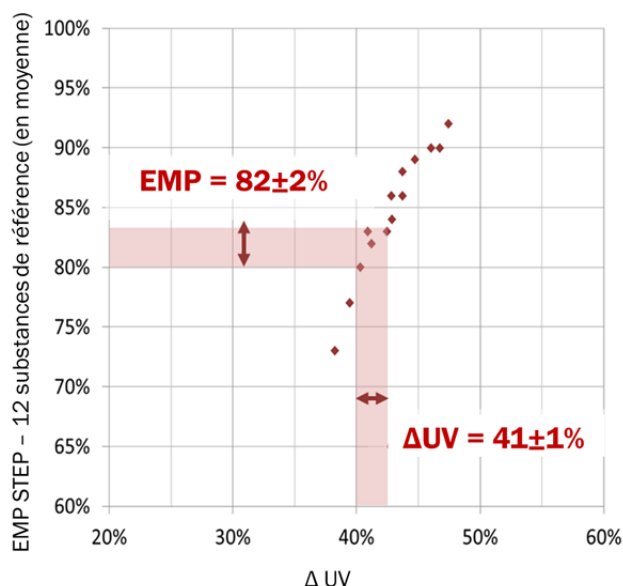


Figure 2. Corrélation entre l'élimination des composés traces (12 substances de référence, conformément à l'Ordonnance du DETEC) et la diminution de l'absorbance UV à 254 nm par ozonation sur la STEP de Neugut (source: Schachtler et Hubaux, 2016a).

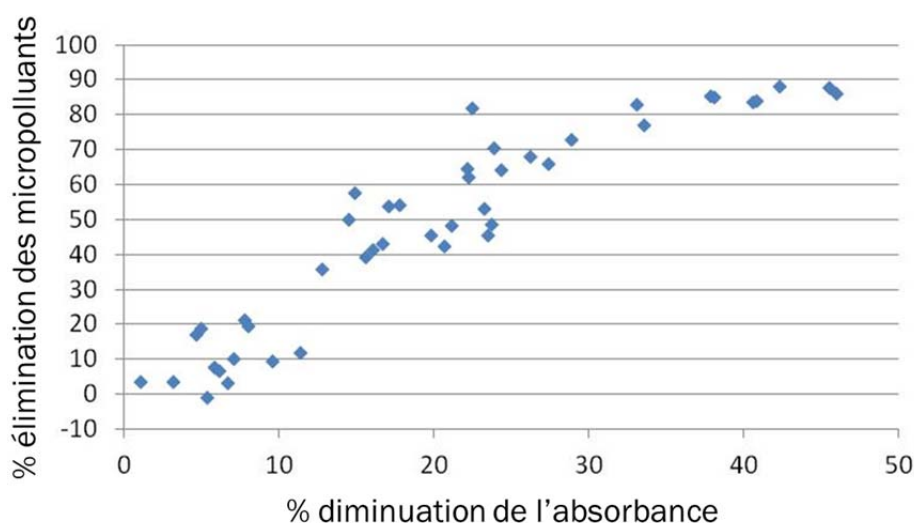


Figure 3. Rapport entre l'élimination des composés traces (12 substances de référence, conformément à l'Ordonnance du DETEC) et la diminution de l'absorbance UV à 254 nm par filtration au CAG: à partir d'une diminution d'absorbance UV de 30%, les composés traces sont éliminés à plus de 80%. Mesures hors ligne lors de l'essai au CAG réalisé sur la STEP de Bülach-Furt: filtre à CAG, filtre à CAG avec charge partielle, filtre de référence, effluent global STEP (source: Laboratoire de protection des eaux AWEL ZH).

Domaine d'application. L'utilisation de la mesure d'absorbance UV a fait ses preuves, aussi bien lors de l'ozonation que des procédés au charbon actif (CAG et CAP). Pour ce qui est de l'utilisation de la mesure d'absorbance UV avec des étapes au charbon actif en poudre, il convient de noter que cela n'est possible qu'avec des procédés placés en aval du traitement biologique, tels que le dosage du charbon actif, à la sortie du décanteur secondaire, dans le réacteur de contact suivi d'une étape de sédimentation puis de filtration ou en cas de dosage direct sur le filtre à sable, mais pas en cas de dosage direct du CAP dans l'étape biologique (la mesure de l'absorbance UV à l'entrée de l'étape de traitement biologique n'est pas recommandée en raison de trop nombreuses interférences provenant de la matrice de fond). Il convient ici d'utiliser un dispositif de mesure alternatif.

Le signal UV peut également être utilisé comme «procédé de test rapide» permettant de présélectionner différentes sortes de charbon actif en poudre dans le cadre de tests par agitation (p. ex. Zietzschmann et al., 2014). Dans la figure 4, l'élimination du candésartan et de l'irbésartan, deux des douze substances de référence exigées par la loi pour contrôler l'efficacité d'élimination (selon l'Ordonnance du DETEC), a été comparée à la diminution de l'absorbance UV (Böhler et al., 2016). On constate très clairement une plus forte diminution de l'absorbance UV en cas d'élimination élevée de composés traces, tandis que la diminution de l'absorbance UV est moins élevée avec une élimination plus faible des composés traces. L'efficacité d'élimination des différents types de charbon actif peut ainsi être testée pour des eaux usées spécifiques.

Fiabilité, maintenance, manipulation. Les applications ont montré qu'une comparaison périodique avec des mesures de composés traces est nécessaire, car la corrélation entre les composés traces et l'absorbance des UV est spécifique à l'eau usée considérée. Pour cette raison, il est probable qu'une certaine saisonnalité apparaisse en raison de la modification de la composition des eaux usées. La disponibilité des données est actuellement encore trop faible pour pouvoir déterminer de manière décisive d'éventuelles influences.

La mesure est relativement simple et considérée comme un procédé de mesure standard facilement reproductible. Le point critique était jusqu'à présent la préparation des échantillons, c'est-à-dire la filtration préalable à la mesure. En effet, un encrassement relativement rapide du filtre lié aux substances organiques largement disponibles (AOC) a été observé sur la sonde placée en aval de l'ozonation, entraînant l'instabilité du signal de mesure. De grands progrès ont pu être réalisés à ce sujet sur la STEP de Neugut depuis début 2015. Selon Schachtler et Hubaux (2016), aucune filtration préalable n'est nécessaire pour permettre une mesure UV stable, lorsque la cellule de mesure est régulièrement nettoyée (idéalement de manière automatique). Les expériences faites dans le Bade-Wurtemberg montrent qu'une filtration préalable est recommandée dans le cas d'une étape au CAP. En effet, particulièrement par temps de pluie, une présence accrue de matières solides provenant du décanteur secondaire peut générer des résultats de mesure imprécis. Bien que cela puisse être compensé automatiquement par certaines sondes, il est recommandé d'utiliser un filtre avant la cellule de mesure UV en cas d'augmentations (périodiques) des concentrations de matières solides, ce qui permet de se passer d'une compensation automatique de la turbidité.

Utilisation en tant que paramètre de commande et de régulation. Différents concepts de commande et de régulation ont été étudiés sur la STEP de Neugut. Il est apparu que le dosage d'ozone fonctionne très bien à l'aide du signal UV à l'entrée du réacteur d'ozone (Fleiner, J., projet de master, 2015) mais l'élimination des composés traces ne peut pas être surveillée de cette manière. Outre la surveillance continue de l'efficacité d'épuration, une mesure UV supplémen-

taire à la sortie de l'ozonation (ΔUV) permet un dosage d'ozone adapté aux besoins et donc une élimination constante des micropolluants (stratégie BEAR selon Schachtler et Hubaux, 2016a et 2016b).

Dans le cas du dosage direct de CAP sur le filtre, la mesure de l'absorbance UV à l'entrée et à la sortie du filtre (ΔUV) est également appropriée, car le système est plus dynamique que dans le cas du dosage de CAP dans le bassin de contact suivi d'une sédimentation et d'une filtration. Une diminution involontaire du dosage de CAP pourrait ainsi être détectée assez rapidement.

Une étude réalisée sur la station d'épuration de Mannheim (dosage dans le bassin de contact suivi d'une sédimentation et filtration) a révélé que, pour le même dosage de charbon, le signal ΔUV diminue beaucoup plus fortement dans des eaux usées diluées (c'est-à-dire absorbance UV faible à l'entrée de l'étape MP) que dans des eaux usées présentant une «absorbance plus élevée à l'entrée» (Neef, 2015). Cela indique que la régulation du dosage de CAP via la diminution de l'absorbance présente également un certain potentiel dans le cas du procédé d'Ulm.

Questions ouvertes, potentiel d'optimisation. Pour obtenir une mesure UV stable, une attention particulière doit toujours être portée à la préparation des échantillons (p. ex. filtration préalable en cas de valeurs élevées de MES en sortie). Mais selon les expériences faites par Hubaux et Schachtler (2016a), une mesure ΔUV stable en cas d'ozonation est parfaitement possible.

Produits disponibles sur le marché. Il existe différents produits sur le marché.

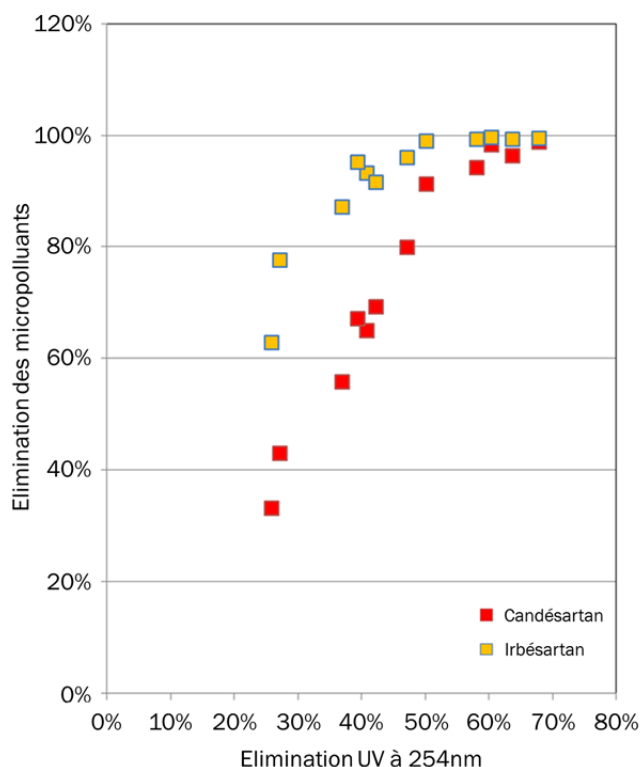


Figure 4 Essais en batch avec des eaux usées épurées biologiquement de la STEP de Glarnerland et du charbon actif en poudre (6 produits CAP différents dosés chacun à 15 mg/l et 30 mg/l). Le taux d'élimination des deux composés traces (candésartan et irbésartan) ainsi que l'absorbance UV ont été déterminés au début des essais et après un temps de contact de 24 heures (source: Böhler et al., 2016).

Conclusion relative à la mesure UV. L'utilisation de la mesure de l'absorbance ΔUV (à l'entrée et la sortie de l'étape MP) pour contrôler l'efficacité d'épuration (ainsi qu'en tant qu'éventuel paramètre de commande et de régulation du dosage d'ozone et de CAP) s'est révélée très prometteuse. D'une part, la corrélation entre la diminution de l'absorbance et des composés traces après l'étape MP est très satisfaisante et d'autre part l'application a fait ses preuves à l'échelle industrielle. Une mesure stable des UV en ligne est tout à fait possible. Il convient de porter une attention particulière à la préparation des échantillons ainsi qu'à l'intégration d'une filtration préalable en cas de valeurs MES élevées en sortie (notamment dans les installations de CAP).

3) Electron Donating Capacity (EDC)

Principe de mesure. Comme pour l'absorbance UV, l'électron donating capacity (EDC) est utilisé comme substitut à l'analyse des composés traces. Ce paramètre est une mesure permettant de définir le potentiel de perte d'électrons et donc le potentiel taux d'oxydation des substances contenues dans les eaux usées. Il s'agit principalement de substances comportant des groupes fonctionnels spécifiques (groupes phénol), qui sont oxydés par l'ozone. L'élimination de ces groupes de substances est directement corrélée avec l'élimination des composés traces (Lee and von Gunten, 2010; Chon et al., 2015). Il s'ensuit que l'EDC est plus élevé à l'entrée de l'étape MP qu'à la sortie (figure 5). Le taux de réduction de l'EDC après l'étape MP dépend du dosage d'ozone.

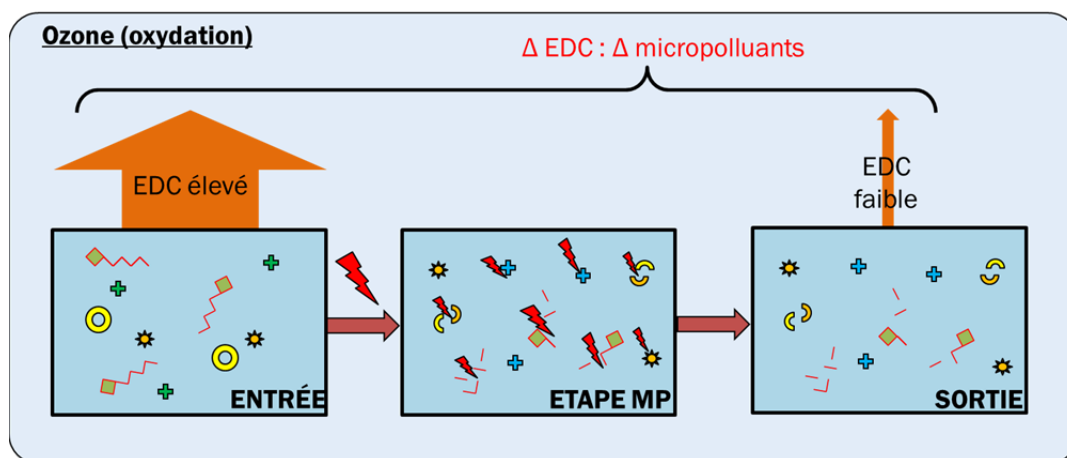


Figure 5 Représentation schématique du concept de diminution EDC pour l'ozonation. Ce procédé n'a pas encore été étudié pour le traitement au charbon actif.

Expériences. Jusqu'à présent, ce concept n'a été appliqué qu'en rapport avec l'ozonation dans une étude sur les eaux usées réalisée en laboratoire (Chon et al., 2015). Il s'est avéré qu'il existe une bonne corrélation entre la diminution de l'EDC et la diminution des composés traces mais ce signal semble être plus sensible à faibles doses d'ozone (<0.25 mg O₃/mg COD) qu'à doses élevées (0.25-1.45 mg O₃/m COD). Cela s'explique par le fait que l'EDC est plus élevé avec des substances facilement dégradables par l'ozone. Cela peut toutefois avoir un effet limitatif pour une application dans des stations d'épuration, car les doses d'ozone sont généralement élevées et se situent donc dans une plage où le signal n'est plus tellement sensible.

Mais la combinaison des mesures EDC et UV s'est révélée intéressante: il est apparu qu'elle permettait de fournir des indications sur la formation de bromate (Chon et al., 2015).

La mesure EDC n'a toutefois pas été appliquée à grande échelle, un appareil de mesure adapté restant encore à optimiser.

Domaine d'application. Dans le domaine des eaux usées, ce concept n'a été testé que pour l'ozonation en laboratoire. Nous ne savons donc pas comment il se comporte avec des systèmes au CAP. Ce concept serait intéressant pour les étapes au CAP uniquement si les mesures EDC étaient plus simples et plus sensibles que les mesures d'absorbance UV. Outre l'élimination des composés traces, ce concept permet d'obtenir des informations sur la formation de bromate, ce qui offrirait des avantages en cas d'ozonation. La sensibilité de la mesure pourrait toutefois être limitée en raison des doses d'ozone élevées habituellement utilisées dans le traitement des eaux usées.

Fiabilité, maintenance, manipulation. Dans l'étude de Chon et al. (2015), un nouveau procédé permettant de déterminer l'EDC a été développé et appliqué. La question de savoir comment cette mesure peut être transposée dans une STEP est encore ouverte.

Utilisation en tant que paramètre de commande et de régulation. Aucune expérience n'a encore été faite à ce sujet.

Questions ouvertes, potentiel d'optimisation. Nous ne savons pas encore précisément dans quelle mesure ce concept peut être transposé à l'échelle industrielle.

Produits disponibles sur le marché. Le procédé de mesure n'est pas encore disponible sur le marché.

Conclusion relative à la mesure EDC. *Le procédé EDC possède un certain potentiel, car il permet - combiné à une mesure de l'absorbance UV - d'obtenir des informations sur une éventuelle formation de bromate, selon les conclusions de Chon et al. (2015). Mais le concept se trouve toujours au stade de recherche et la mesure n'est pas encore disponible sur le marché. Il vaut la peine de garder ce concept à l'esprit et de l'intégrer, le cas échéant, dans des projets futurs.*

4) Fluorescence

Principe de mesure. L'excitation des substances organiques dissoutes dans les eaux usées épurées est obtenue par le biais d'une émission lumineuse (p. ex. à 254 nm; Gerrity et al., 2012). L'échantillon d'eau émet un spectre de fluorescence caractéristique, qui peut être détecté. Les structures moléculaires sont modifiées par l'oxydation (ou l'adsorption sur charbon actif) des composés traces (et les molécules sont éliminées de l'eau en cas d'utilisation de charbon actif), ce qui génère une modification du spectre de fluorescence (figure 6).

Expériences. Cette méthode n'a pas encore été étudiée de manière intensive dans le contexte du contrôle du taux d'épuration atteint avec les étapes MP dans les STEP. Dans une étude (Gerrity et al., 2012), une corrélation entre la diminution de la fluorescence et la diminution des composés traces a été étudiée pour l'ozonation. Dans un projet encore en cours à l'Université technique de Vienne, la spectrofluorométrie est utilisée pour garantir la maîtrise du processus d'ozonation et de CAG (Kornfeind et al., 2015).

Selon Henderson et al. (2009), la sensibilité de la mesure de fluorescence est 10 à 1000 fois supérieure que celle de la mesure de l'absorbance UV.

Domaine d'application. La mesure de la fluorescence est appliquée de manière routinière pour détecter la prolifération d'algues dans les lacs (via la mesure de la fluorescence de la chloro-

phylle). Elle est également utilisée dans un projet actuellement en cours relatif à l'élimination des composés traces dans les STEP (Kornfeind et al., 2015).

Fiabilité, maintenance, manipulation. Aucune assertion ne peut être faite à ce sujet, car les expériences ne sont pas assez nombreuses.

Utilisation en tant que paramètre de commande et de régulation. Ici aussi, aucune assertion ne peut être faite compte tenu du manque d'expérience.

Questions ouvertes, potentiel d'optimisation. Les expériences permettant d'identifier les points faibles ou un potentiel d'optimisation font actuellement défaut. Les points suivants sont particulièrement importants: (i) charge de calibration, (ii) domaine d'application, (iii) influences saisonnières, (iv) résolution de mesure, (v) sensibilité, (vi) précision de mesure, etc.

Produits disponibles sur le marché. Actuellement indéterminé.

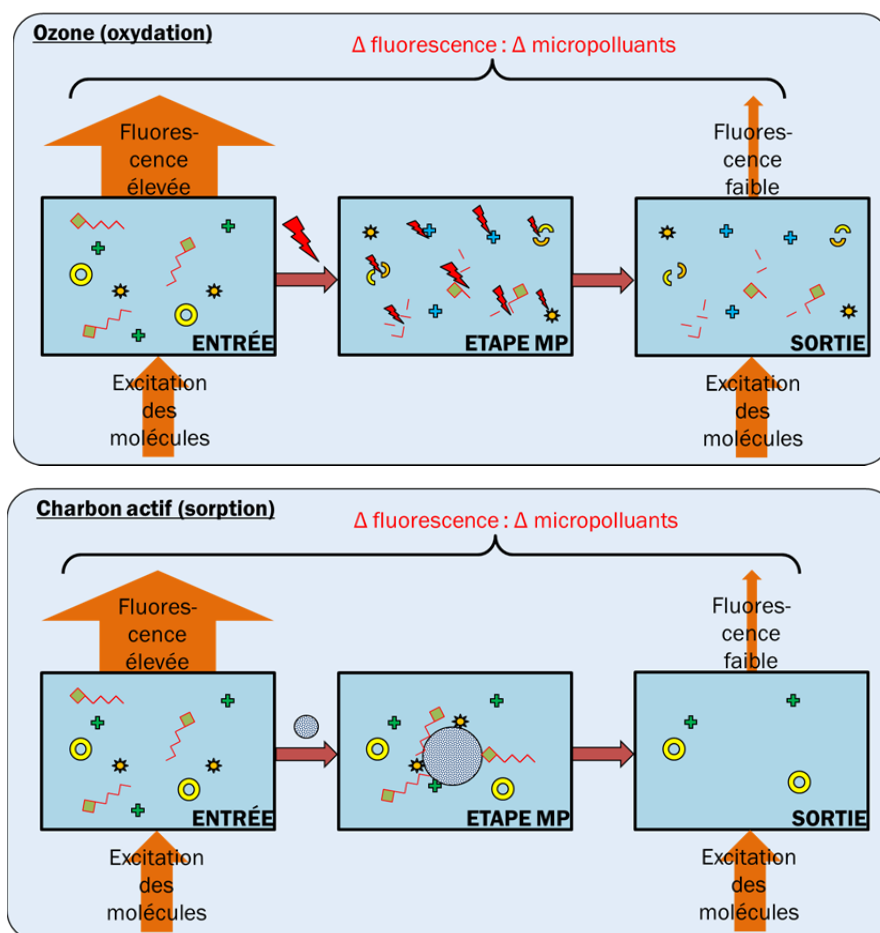


Figure 6 Représentation schématique du concept de «diminution de fluorescence» pour l'ozonation (en haut) et le charbon actif (en bas). Pour une meilleure compréhension: avant le traitement MP, la fluorescence est élevée (de nombreuses substances sont excitées et émettent ensuite de la lumière dans le spectre de fluorescence), tandis que la fluorescence est faible après le traitement MP (une grande partie des substances ayant été éliminées par le traitement MP).

Conclusion relative à la mesure de la fluorescence. La mesure de la fluorescence est une approche similaire à la mesure de l'absorbance UV. Les avantages/inconvénients de cette méthode

sont encore trop peu connus, car ce principe de mesure n'a pas encore été utilisé dans le domaine des eaux usées (échelle pilote/industrielle). Les expériences et conclusions correspondantes font donc encore défaut. Il faudrait que cette méthode présente des avantages notables par rapport à la mesure de l'absorbance UV pour être utilisée dans les STEP.

5) Substance organique (COD / DCO)

Principe de mesure. Différentes études ont montré que l'ajout de charbon actif dans les eaux usées épurées permettait non seulement de diminuer les composés traces, mais aussi de réduire jusqu'à 40-50% les autres substances organiques (également connues sous le nom de paramètres cumulatifs «COD» ou «DCO») qui se déposent à la surface du charbon (Böhler et al., 2012). En revanche, le COD n'est pas éliminé de manière substantielle par le traitement à l'ozone car l'ozone réagit surtout avec des composés riches en électrons (p. ex. Lee et al., 2012). Dans le cadre du projet ReTreat mené sur la STEP de Neugut, le taux d'élimination de COD moyen obtenu par ozonation est compris entre 5 et 10% seulement (Böhler et al., 2015). L'élimination du COD (ou de la DCO) peut être considérée comme un indicateur potentiel de l'efficacité de l'élimination des composés traces, notamment en cas d'utilisation de charbon actif (figure 7).

Expériences. Dans une étude réalisée dans la station d'épuration de Mannheim (Neef, 2015), une corrélation entre les paramètres cumulatifs DCO, COD et l'absorbance UV à 254 nm a été confirmée lors de l'étape MP (de l'entrée jusqu'à la sortie). Mais certains échantillons présentent aussi des écarts en termes de corrélation, ce qui indique que les «paramètres cumulatifs» (DCO, COD et absorbance UV) permettent de répertorier différentes substances (molécules organiques). Cela paraît logique, car les substances organiques ne répondent pas toutes à l'absorbance UV. La corrélation avec les composés traces est toutefois décisive pour contrôler l'efficacité d'épuration.

La question de savoir si une élimination DCO/COD peut être utilisée comme paramètre de remplacement pour les composés traces devra encore faire l'objet d'un examen complémentaire.

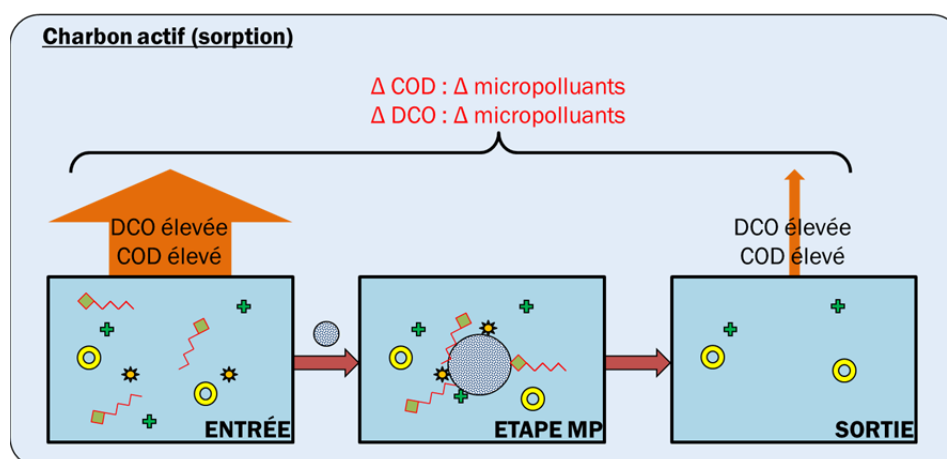


Figure 7. Représentation schématique du concept avec une application au charbon actif. En cas d'ozonation, l'élimination du COD/de la DCO est moins élevée.

Domaine d'application. L'utilisation de cette méthode est envisageable pour les étapes au charbon actif en poudre (placées en aval, selon le procédé avec réacteur de contact et sédimentation ou dosage direct sur filtre à sable, mais pas en cas de dosage direct de CAP dans l'étape de traitement biologique), ainsi que pour la filtration au charbon actif en grains (CAG).

Fiabilité, maintenance, manipulation. Les mesures de la DCO/du COD sont effectuées en laboratoire selon une procédure de mesure standard (mesure Lange). Des mesures de la DCO/du COD périodiques des échantillons composites ont ainsi pu être effectuées en laboratoire. Des appareils de mesure de COD en ligne peuvent constituer une alternative par rapport aux mesures de laboratoire périodiques. Pour ce faire, il est important que la mesure soit effectuée de manière stable, avec suffisamment de précision et aussi peu de maintenance que possible. Une mesure en ligne peut constituer un procédé de mesure possible pour l'avenir.

Utilisation en tant que paramètre de commande et de régulation. Si les conditions sont réunies (appareil de mesure de COD en ligne stable, suffisamment exact et nécessitant peu de maintenance), le signal COD peut se révéler intéressant à l'avenir comme paramètre de commande et de régulation.

Questions ouvertes, potentiel d'optimisation. Nous disposons actuellement de trop peu de données pour tirer des conclusions définitives. D'autres mesures doivent être effectuées et évaluées pour pouvoir mieux maîtriser la corrélation entre la diminution de la DCO/du COD et des composés traces. Il convient également d'étudier les influences saisonnières et de prendre en compte les jours de pluie.

Produits disponibles sur le marché. Différents produits permettant d'effectuer des mesures de la DCO/du COD sont proposés sur le marché.

Conclusion relative à la mesure de la DCO/du COD. Ce concept présente un certain potentiel uniquement pour le procédé au charbon actif, car l'élimination de la DCO/du COD est plus élevée qu'avec le traitement par ozonation. Dans une installation d'ozonation, l'apport d'ozone pourrait toutefois être régulé en fonction des besoins et de la concentration de COD à l'entrée. Des mesures en laboratoire pourraient également être envisagées, en guise d'alternative à la mesure en ligne. Dans le cas du procédé avec réacteur de contact placé en aval et sédimentation, la mesure de 2-3 échantillons composites par semaine pourrait suffire. Mais il faudrait disposer de données supplémentaires pour pouvoir tirer des conclusions sans équivoque. La corrélation entre la diminution de COD et celle des composés traces doit être déterminée au cas par cas.

6) Autres concepts

Concentration d'ozone dans le réacteur d'ozonation. Lors du traitement de l'eau potable, l'ozonation peut être régulée au moyen de la mesure d'ozone en ligne. Ce tout nouveau concept est actuellement mis en place dans l'approvisionnement en eau potable de Zurich (Kaiser et al., 2013): une mesure de la concentration d'ozone à l'entrée, ainsi qu'une détermination continue du taux d'élimination de l'ozone (dans des réacteurs batch externes) permettent, en combinaison avec d'autres paramètres, d'analyser l'élimination des composés traces ainsi que l'efficacité de désinfection. Mais, la décomposition de l'ozone est un peu plus rapide dans le traitement des eaux usées que dans celui de l'eau potable en raison de la matrice d'arrière-plan, ce qui rend plus difficile la détermination de la concentration d'ozone dissous dans le réacteur. Mesurer la concentration d'ozone dissous semble par ailleurs difficile d'un point de vue technique (décomposition de l'ozone dans les conduites de l'échantillonnage). Une mise en œuvre de ce concept dans le traitement des eaux usées semble donc actuellement plutôt peu probable.

Potentiel redox dans le réacteur de l’ozone. Dans le principe, le potentiel redox est une approche intéressante avec une méthode de mesure plutôt simple. Les applications ont toutefois révélé une sensibilité trop faible. L’adéquation de cette méthode pour surveiller l’exploitation peut donc être qualifiée de faible. Le signal redox semble en revanche tout à fait adapté pour détecter une éventuelle perte d’ozone à la sortie du réacteur d’ozone. En effet, cette application ne nécessite pas une valeur de mesure absolue, une modification relative du signal étant suffisante (une augmentation continue du signal redox signifierait par exemple une augmentation de la concentration d’ozone en sortie).

Concentration d’ozone dans l’air sortant. La teneur en ozone dans l’air sortant du réacteur est enregistrée de manière continue. Dans la mesure où l’apport d’ozone est plus ou moins complet après une hauteur de soufflage de 5-6 mètres, les concentrations d’air sortant sont normalement très basses (env. 0.8-6 ppm). Une augmentation soudaine de la concentration d’air sortant indiquerait la nécessité d’effectuer un «contrôle de l’exploitation» (en vue de clarifier les causes éventuelles de cette augmentation, p. ex. événement de pluie, modification de la consommation d’ozone par les eaux usées, etc.). Ce paramètre concerne principalement des modifications relatives et non des valeurs absolues. Globalement, cette mesure est un paramètre de surveillance possible pour déterminer l’état de l’exploitation. L’information étant beaucoup moins sensible que la mesure de l’absorbance UV, par exemple, le potentiel de cette méthode pour la surveillance de l’exploitation est donc qualifiée de faible. La mesure de la concentration d’ozone dans l’air sortant ne se prête pas à la régulation du dosage d’ozone mais est une mesure importante pour les aspects liés à la sécurité.

Concentration d’ozone dans l’effluent. La concentration d’ozone dissous peut être mesurée en ligne en sortie du réacteur d’ozone. Le dosage d’ozone pourrait être régulé sur la base de ce signal, néanmoins la détection des faibles concentrations d’ozone est problématique (les appareils de mesure ont besoin d’une concentration minimale d’ozone), ce qui génère des frais de maintenance élevés. Les autres points en suspens sont les suivants: comportement indéterminé en cas de différence de débit (où serait le point de mesure approprié dans le réacteur? Le point de prélèvement pourrait-il varier?). La combinaison avec une mesure de débit serait alors obligatoire. Le potentiel d’utilisation de cette méthode pour mesurer la concentration d’ozone à des fins de surveillance est considéré comme plutôt faible.

Une mesure d’ozone (ou de manière alternative la mesure du signal redox, voir plus haut) dans la partie arrière du réacteur est pertinente pour empêcher l’épanchement d’ozone en cas de surdosages d’ozone. Ce concept a par exemple été testé dans le cadre d’essais pilotes à Lausanne (Margot et al., 2011). A la STEP de Neugut, le signal redox est utilisé pour surveiller le flux sortant (voir également le document «Aspects de sécurité relatifs à la manipulation d’ozone dans les stations d’épuration»).

Turbidité en sortie d’étapes au CAP. La mesure de la turbidité en sortie (c’est-à-dire après l’étape de polissage) permet de détecter suffisamment tôt une éventuelle perte de CAP en sortie. Cette méthode ne convient pas pour la surveillance de l’exploitation, mais peut être intéressante dans le domaine de la sécurité, notamment pour introduire un dispositif d’arrêt d’urgence de dosage de CAP. Afin de pouvoir analyser le rapport quantitatif entre la turbidité et la perte de CAP, des mesures de comparaison périodiques sont recommandées à l’aide du procédé thermogravimétrique développé par Krahnstöver et al. (2016). Cette méthode permet de déterminer de manière relativement exacte la concentration de CAP en sortie.

Paramètres d'exploitation conventionnels. L'enregistrement d'indicateurs d'exploitation conventionnels peut permettre de tirer des conclusions approximatives sur l'exploitation de l'étape d'élimination des micropolluants. Les indicateurs d'exploitation suivants peuvent être utilisés: (i) quantité d'eaux usées traitées (total journalier), (ii) consommation d'oxygène en cas d'ozonation (quantités mensuelles et remplissage du réservoir), (iii) consommation d'énergie électrique pour la production d'ozone (total mensuel), (iv) dosage quotidien moyen (en mg d'ozone/ litre ou en mg de CAP / litre), (v) heures d'exploitation du générateur d'ozone (total mensuel), (vi) perturbations et mises hors service (description). Les paramètres d'exploitation conventionnels sont enregistrés de manière routinière et permettent un contrôle (très) approximatif de l'efficacité d'épuration. Une évaluation basée sur ces seuls paramètres d'exploitation est toutefois trop peu précise. Une combinaison avec une autre méthode (p. ex. mesure d'absorbance UV) est donc nécessaire.

Mesures en ligne écotoxicologiques. Des tests écotoxicologiques choisis de manière ciblée peuvent permettre de surveiller en ligne la sortie de la STEP. Certains systèmes de test sont actuellement disponibles (sous forme de sonde en ligne: p. ex. utilisation de gammaridés (Gerhardt et al., 2013) ou le concept «Watch Frog», voir www.watchfrog.fr/), mais ces tests se trouvent encore au stade de la recherche et leur exécution est plutôt fastidieuse, ou il est encore difficile de savoir ce qu'ils permettent exactement de mesurer (quelles substances/quels groupes de substances, etc.). Il n'est pas possible à l'heure actuelle d'estimer quand ce type de procédure de test pourra être disponible pour effectuer des mesures continues en sortie de STEP. En outre, il est difficile de savoir si ces concepts fournissent des informations effectives sur l'exploitation actuelle ou peuvent plutôt donner des renseignements sur les évolutions à moyen / long terme (p. ex. sur les effets dans les eaux). Eu égard aux coûts générés et aux avantages procurés, l'adéquation des sondes en ligne écotoxicologiques pour surveiller l'exploitation est pour le moment incertaine.

Analyse des composés traces en ligne. La possibilité d'effectuer des analyses de composés traces en ligne est étudiée dans l'article de Url et al. (2016). Pour ce faire, différents procédés de mesure sont comparés les uns avec les autres. L'analyse en ligne des composés traces visant à contrôler l'efficacité d'épuration dans les stations d'épuration doit toutefois être évaluée de manière très critique et n'est actuellement pas considérée comme un concept alternatif permettant de remplacer la surveillance continue de l'efficacité d'épuration.

Conclusion relative aux autres concepts. Les concepts mentionnés dans ce chapitre ne conviennent pas directement à la surveillance quotidienne de l'efficacité d'épuration des étapes supplémentaires visant à éliminer les composés traces. Les concepts mentionnés peuvent être répartis dans les domaines suivants:

(i) Concepts permettant une **évaluation «approximative» (mais pas suffisamment précise)** de l'efficacité d'épuration, comme les paramètres d'exploitation conventionnels, pouvant peut-être compléter de manière pertinente d'autres méthodes (p. ex. mesure de l'absorbance UV).

(ii) Concepts **plutôt inadaptés à la surveillance de l'exploitation, mais jouant un rôle important pour les aspects liés à la sécurité**, par exemple mesure de la concentration d'ozone dans l'air sortant/l'effluent, mesure de la turbidité à la sortie des étapes au CAP et mesure du potentiel redox à la sortie des réacteurs d'ozone.

*(iii) Concepts **intéressants sur le principe, mais pas (encore) suffisamment développés** (p. ex. mesures écotoxicologiques en ligne, analyse des composés traces en ligne) ou dont l'utilisation **semble difficilement réalisable du point de vue de la technique de mesure au vu des circonstances** (p. ex. décomposition rapide de l'ozone dans les eaux usées).*

7) Conclusion générale

Les méthodes et concepts décrits constituent un état des lieux des connaissances et des expériences actuellement disponibles. Ce travail a permis d'identifier différentes méthodes possédant un grand potentiel pour la surveillance quotidienne de l'efficacité d'épuration des étapes d'épuration supplémentaires visant à éliminer les composés traces. Parmi celles-ci, citons l'absorbance UV à 254 nm (aussi bien pour l'ozonation que pour les installations à charbon actif, voir également la stratégie BEAR selon Schachtler et Hubaux, 2016a & b), ainsi que la diminution de la DCO et éventuellement du COD dans le cas d'une étape à charbon actif. Pour les installations d'ozonation, la mesure de l'EDC (electron donating capacity) est très utile pour identifier une éventuelle formation de bromate, en complément de l'absorbance UV. Cette méthode se trouve toutefois encore au stade de la recherche. En ce qui concerne la mesure de la fluorescence, l'avantage par rapport à la mesure de l'absorbance UV n'a pas encore été mis en évidence et aucun appareil de mesure pouvant être utilisé dans les STEP n'est disponible dans le commerce.

Parallèlement à la mesure périodique des composés traces (imposée par les exigences légales), il est recommandé de mesurer le signal d'absorbance UV à 254 nm en entrée et en sortie de l'étape d'élimination des composés traces ($\Delta UV = (UV_{in} - UV_{out})/UV_{in}$) afin de surveiller l'efficacité d'épuration. Pour ce faire, une mesure en ligne peut être utilisée (les sondes sont disponibles sur le marché). Mais il est également possible d'obtenir des informations sur l'élimination des composés traces en effectuant des mesures UV périodiques d'échantillons composites en laboratoire.

8) Collecte centralisée et stockage des données

Les données sont disponibles sous forme anonyme sur la plateforme «Techniques de traitement des micropolluants». L'enregistrement des données permettant de déterminer la corrélation avec les composés traces peut ainsi être étendu en continu en fonction des procédures utilisées.

9) Bibliographie

- Altmann, J., Sperlich, A., Jekel, M. (2015). Integrating organic micropollutant removal into tertiary filtration: Combining PAC adsorption with advanced phosphorus removal. *Water Research*, 84: 58-65.
- Boehler, M., Zwicklenpflug, B., Hollender, J., Ternes, T., Joss, A., Siegrist, H. (2012). Removal of micropollutants in municipal wastewater treatment plants by powder-activated carbon. *Water Science and Technology*, 66: 2115-2121.
- Böhler, M., Fleiner, J., Schachtler, M., Siegrist, H. (et Partner ReTREAT; 2015). Übersicht zu den biologischen Nachbehandlungen – Projekt ReTREAT – Verfahrenstechnik und Betriebsergebnisse. VSA/PEAK Cours, vendredi 12 et 19 juin 2015.

- Böhler, M., McArdeall, C.S., Biermann, K., Bourgin, M., Fleiner, J. (2016). Evaluation geeigneter Aktivkohlen für den Abwasserverband Glarnerland (AVG) – Teilauszug der Ergebnisse.
- Chon, K., Salhi, E., von Gunten, U. (2015). Combination of UV absorbance and electron donating capacity to assess degradation of micropollutants and formation of bromate during ozonation of wastewater effluents. *Water Research*, 81: 388-397.
- Fleiner, J. (2015). Praxisanwendung einer online UV-Messung zur Optimierung der Ozondosierung zur Elimination von Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser, Masterarbeit. In Zusammenarbeit mit der Eidgenössischen Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz, Eawag, Dübendorf, Schweiz, und der ARA Neugut, Dübendorf, Schweiz.
- Gerhardt, A., Bühler, C., Hofer, M. (2013). Biomonitoring in der kommunalen Abwasserreinigung. *Aqua & Gas*, n° 7/8, p. 58-62.
- Gerrity, D., Gamage, S., Jones, D., Korshin, G.V., Lee, Y., Pisarenko, A., Trenholm, R.A., von Gunten, U., Wert, E.C., Snyder, S.A. (2012) Development of surrogate correlation models to predict trace organic contaminant oxidation and microbial inactivation during ozonation. *Water Research*, 46: 6257-6272.
- Henderson, R.K., Baker, A., Murphy, K.R., Hambly, A., Stuetz, R.M., Khan, S.J. (2009) Fluorescence as a potential monitoring tool for recycled water systems: A review. *Water Research*, 43: 863-881.
- Kaiser H.-P., Köster, O., Gresch, M., Périsset, P.M.J., Jäggi, P., Salhi, E., von Gunten, U. (2013) Process control for ozonation systems: A novel real-time approach. *Ozone: Science & Engineering*, 35: 168-185.
- Kornfeind, L., Winkelbauer, A., Schaar, H., Haslinger, J., Walder, C., Saracevic, E., Kreuzinger, N. (2015). Applying 3D-fluorescence spectroscopy as process control for micropollutant removal by activated carbon and ozonation as advanced wastewater treatment steps. 9th IWA Specialised Conference on Assessment and Control of Micropollutants and Hazardous Substances in Water, 22-26 November 2015, Singapore.
- Krahnstöver, T., Plattner, J., Wintgens, T. (2016). Quantitative detection of powdered activated carbon in wastewater treatment plant effluent by thermogravimetric analysis (TGA). *Water Research* 101, 510-518.
- Lee, Y., Gerrity, D., Lee, M., Encinas Bogeat, A., Salhi, E., Gamage, S., Trenholm, R.A., Wert, E.C., Snyder, S.A., von Gunten, U. (2013). Prediction of micropollutant elimination during ozonation of municipal wastewater effluents: Use of kinetic and water specific information. *Environmental Science and Technology*, 47: 5872-5881.
- Margot, J., Magnet, A., Thonney, D., Chevre, 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.
- Neef, J. (2015). Einsatz von SAK-Sonden zur Überwachung des adsorptiven Reinigungsprozesses am Beispiel der Kläranlage Mannheim, Masterarbeit. Durchgeführt bei dem Eigenbetrieb

Stadtentwässerung Mannheim in Kooperation mit dem Kompetenzzentrum Spurenstoffe (KomS) Baden-Württemberg.

Schachtler, M., Hubaux, N. (2016a). BEAR: Elimination stable des micropolluants avec Bear – SStratégie de contrôle de l’ozonation innovatrice avec des sondes UV. Aqua & Gas N° 5, p. 84-93.

Schachtler, M., Hubaux, N. (2016b). Bedarfsgerechte Ozonproduktion mit BEAR – ARA Neugut: MV-Elimination seit 2014 Betrieb & Entwicklungen. Emmetten, 1.3.6.2016.

Url, M., Hiller, C., Schuhen, K. (2016). Detektion von organischen Spurenstoffen in kommunalen Kläranlagen, Korrespondenz Abwasser, Abfall, 63, Nr. 2, S. 119-123.

Ordonnance du DETEC visant à contrôler l’efficacité des mesures d’élimination des composés traces organiques dans les installations d’épuration des eaux usées, 15 février 2016, ordonnance.

Wittmer, A., Heisele, A., McArdell, C.S., Böhler, M., Longree, P., Siegrist, H. (2015). Decreased UV absorbance removal efficiency in wastewater treated with ozone. Water Science and Technology, 71: 980-985.

Wittmer, A., Ramisberger, M., Böhler, M., Heisele, A., Hollender, J., Mc Ardell, C., Longrée, P., Siegrist, H. (2013) UV-Messung zur Regelung der Ozondosis und Überwachung der Reinigungsleistung – Labor- und halbtechnische Pilotversuche. Eawag, rapport final, n° de projet 85341.

Zietzschmann, F., Altmann, J., Ruhl, A.S., Dünnbier, U., Dommisch, I., Sperlich, A., Meinel, F., Jekel, M. (2014) Estimating organic micro-pollutant removal potential of activated carbons using UV absorption and carbon characteristics. Water Reserach, 56: 48-55.