

VÉRIFICATIONS RELATIVES À L'ADÉQUATION DU PROCESSUS D'OZONATION

AMÉLIORATION DE LA BASE DÉCISIONNELLE

La recommandation du VSA publiée en 2017, intitulée «Vérifications relatives à l'adéquation du processus d'ozonation», s'est avérée pertinente dans la pratique et permet d'identifier de manière fiable les eaux usées inadaptées à une ozonation. Au cours des dernières années, nous avons élargi de façon ciblée les connaissances disponibles et renforcé la base décisionnelle pour les futures vérifications. Ces améliorations permettent d'apprécier de manière plus précise si les eaux usées conviennent à un traitement par ozonation.

Pascal Wunderlin; Simon Bitterwolf, Plateforme VSA Techniques de traitement des micropolluants; Alessandro Piazzoli, Envilab SA

ZUSAMMENFASSUNG

ABKLÄRUNGEN VERFAHRENEIGNUNG OZONUNG ENTSCHEIDUNGSGRUNDLAGE VERBESSERT

Die Eignung eines Abwassers für die Behandlung mit Ozon wird seit 2017 gemäss der VSA-Empfehlung «Abklärungen Verfahrenseignung Ozonung» beurteilt. Eine Zwischenbilanz im Jahre 2020 bestätigte, dass sich die Abklärungen in der Praxis bewährt haben und sie ungeeignete Abwässer zuverlässig identifizieren. Seither wurde das Wissen gezielt erweitert:

Die erste Frage war, wie gut die Abklärungen Verfahrenseignung Ozonung im Labor eine grosstechnische Ozonung abbilden. Die Untersuchungen ergaben, dass die Labortests die Leitsubstanzen tendenziell besser eliminieren und auch tendenziell mehr Bromat bilden, verglichen mit grosstechnischen Ozonungen.

Zweitens wurde eine Methode evaluiert, mit der die Nitrifikation einer Abwasserreinigungsanlage (ARA) im Labor simuliert werden kann. Das ist notwendig, um die Eignung von Abwasser für eine Ozonung bereits heute beurteilen zu können, obwohl noch kein repräsentatives Abwasser vorliegt – weil die ARA beispielsweise erst künftig eine Nitrifikationsbehandlung einführt oder sich mit einer anderen ARA zusammenschliesst. Die Untersuchungen ergaben, dass die evaluierte Labornitrifikation die grosstechnische ARA gut abbildet und die Abwasserzusammensetzung in Bezug auf die Eignung von Ozon nicht signifikant verändert. Eine zusätzliche Pilotierung zur Nitrifikation ist somit nicht notwendig.

INTRODUCTION

L'ozonation s'est imposée, aux côtés des procédés à charbon actif, comme une méthode efficace et économique pour l'élimination des micropolluants (MP) présents dans les eaux usées communales. À la fin de l'année 2025, 13 installations d'ozonation étaient en exploitation sur des stations d'épuration (STEP) communales en Suisse, et environ 18 autres en phase de planification ou de construction. Avec la mise en œuvre prochaine de la motion 20.4262 ainsi que l'introduction d'exigences numériques pour les trois substances pharmaceutiques azithromycine, clarithromycine et diclofénac dans les eaux (annexe 2, CEaux), les processus d'ozonation ou les combinaisons de procédés incluant l'ozonation gagneront encore en importance (voir encadré 1).

Un test en plusieurs étapes, les vérifications relatives à l'adéquation du processus d'ozonation (*fig. 1*) [3-5], est utilisé pour évaluer si une eau usée convient à un traitement par ozonation. Des rejets importants d'eaux usées industrielles ou artisanales dans le bassin versant de la STEP peuvent notamment influencer la composition des eaux usées de telle sorte qu'une ozonation entraîne une formation excessive de sous-produits d'oxydation indésirables (notamment le bromate, considéré comme potentiellement cancérigène et mutagène). Une telle situation doit être évitée.

Contact: alessandro.piazzoli@envilab.ch

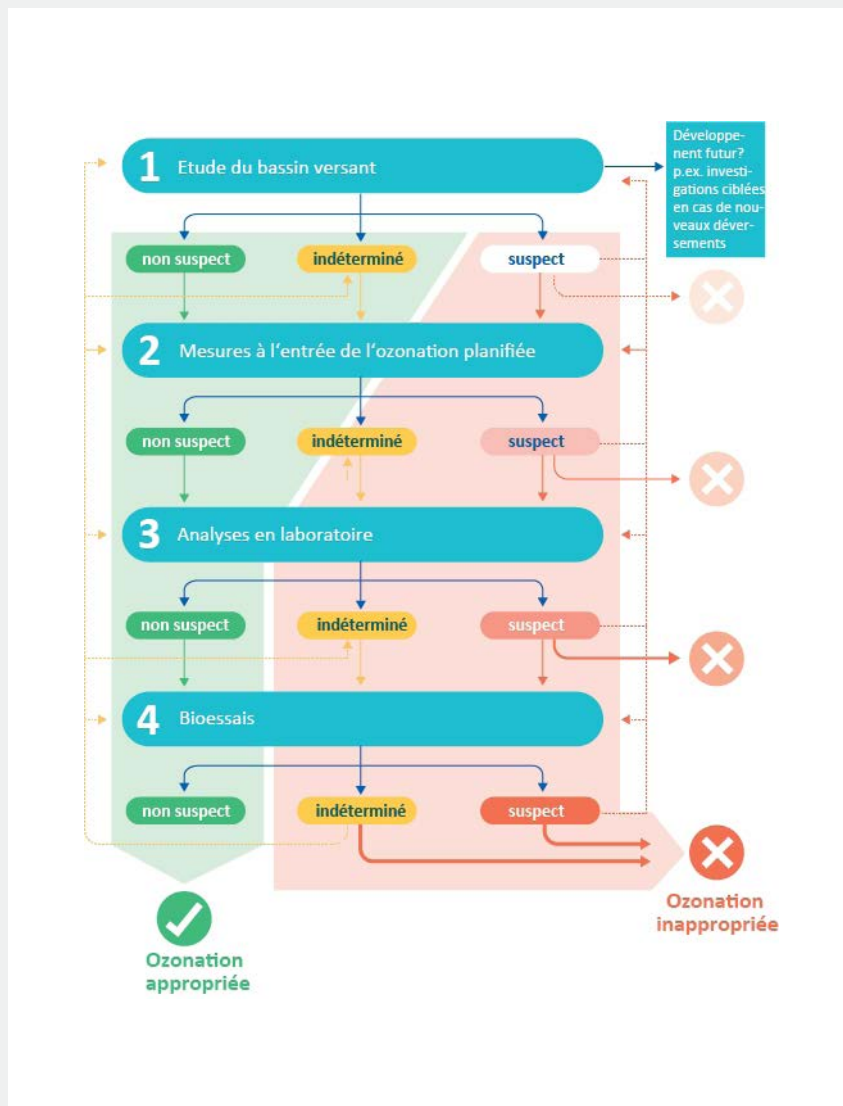


Fig. 1 Représentation schématique de la procédure appliquée lors des vérifications relatives à l'adéquation du processus d'ozonation. Les lignes en pointillé indiquent qu'en cas de résultats peu clairs ou atypiques, certaines vérifications devraient être répétées. Source: [4].

Il est recommandé de vérifier suffisamment tôt si une eau usée donnée est ou non adéquate à un traitement par ozonation, cette adéquation constituant une condition préalable à l'octroi des subventions. La procédure ainsi que l'interprétation de ce test d'adéquation sont décrites dans la recommandation du VSA «Vérifications relatives à l'adéquation du processus d'ozonation» [4]. Une instruction de travail distincte (SOP) précise la manière dont les essais de laboratoire doivent être réalisés [6].

Pendant l'exploitation des installations d'ozonation, le VSA recommande de surveiller de manière ciblée la composition des eaux usées ainsi que leur aptitude à l'ozonation [7]. En effet, même après la décision relative au processus, la composition des eaux usées dans le bassin versant de la STEP peut évoluer.

VÉRIFICATIONS ONT FAIT LEURS PREUVES DANS LA PRATIQUE

Depuis 2015, environ 100 STEP (état: septembre 2025) ont réalisé ce test d'adéquation. Pour près de 62% des STEP examinées, les eaux usées ont été jugées adaptées à une ozonation; pour environ 33%, elles ont été considérées comme inadaptées, et dans près de 5% des cas, les résultats se situaient dans une zone d'incertitude. Dans ces derniers cas, des vérifications complémentaires sont nécessaires, par exemple la répétition de certains modules.

La figure 2 compare la fréquence à laquelle chaque module a été réalisé par rapport aux autres modules (c'est-à-dire que 100% correspond au module ayant fait l'objet du plus grand nombre d'analyses, en l'occurrence le module 2 «Mesures à l'entrée de

ADÉQUATION DE L'OZONATION ET ÉLIMINATION DU DICLOFÉNAC: UNE FUTURE PESÉE DES INTÉRÊTS?

Le diclofénac dépasse fréquemment, dans les cours d'eau recevant des eaux usées traitées, la valeur limite écotoxicologique fixée pour les eaux et met ainsi en danger les organismes aquatiques [1]. En particulier dans les eaux présentant une forte proportion d'eaux usées, des procédés permettant une élimination aussi complète que possible du diclofénac sont donc nécessaires sur les STEP.

Avec les dosages habituels d'ozone, dimensionnés pour atteindre le taux d'élimination des micropolluants de 80% exigé par la législation, le diclofénac peut être éliminé à environ 99%. À titre de comparaison, le charbon actif atteint une élimination d'environ 85% [2]. Il peut dès lors s'avérer nécessaire de procéder à une pesée des intérêts: une ozonation est souvent indispensable pour satisfaire aux exigences en matière de qualité des eaux. Son application peut toutefois poser problème, par exemple en présence de concentrations élevées de bromure dans les eaux usées. Dans de tels cas, le choix du procédé devrait être effectué en étroite concertation avec l'autorité d'exécution compétente.

Avec la mise en œuvre de la motion 20.4262, de nombreuses STEP de petite taille – c'est-à-dire des STEP desservant moins de 8000 équivalents-habitants – devront à l'avenir construire une étape de traitement des micropolluants afin de respecter les exigences légales relatives aux eaux [1]. Pour cette catégorie de STEP, le risque de formation de produits de réaction problématiques lors de l'ozonation est généralement faible, car les petites STEP ont, selon l'expérience, moins d'apports industriels et les causes potentielles, telles que des teneurs élevées en bromure, peuvent être plus facilement identifiées dans leurs bassins versants limités.

Dans tous les cas, il doit être démontré qu'aucun produit de réaction problématique ne se forme avec les différents états d'exploitation de la STEP. À cet effet, des modes d'exploitation adaptés ou des combinaisons de différents procédés peuvent être mis en œuvre.

Encadré 1

l'ozonation planifiée»). La figure 2 indique également la classification qui en résulte en «vert/adapté», «jaune/incertain» ou «rouge/inadapté». Elle confirme ce à quoi l'on peut s'attendre compte tenu de la structure modulaire de la procédure: le module 2 est le plus fréquemment réalisé, suivi des modules 3 et 4. À mesure que

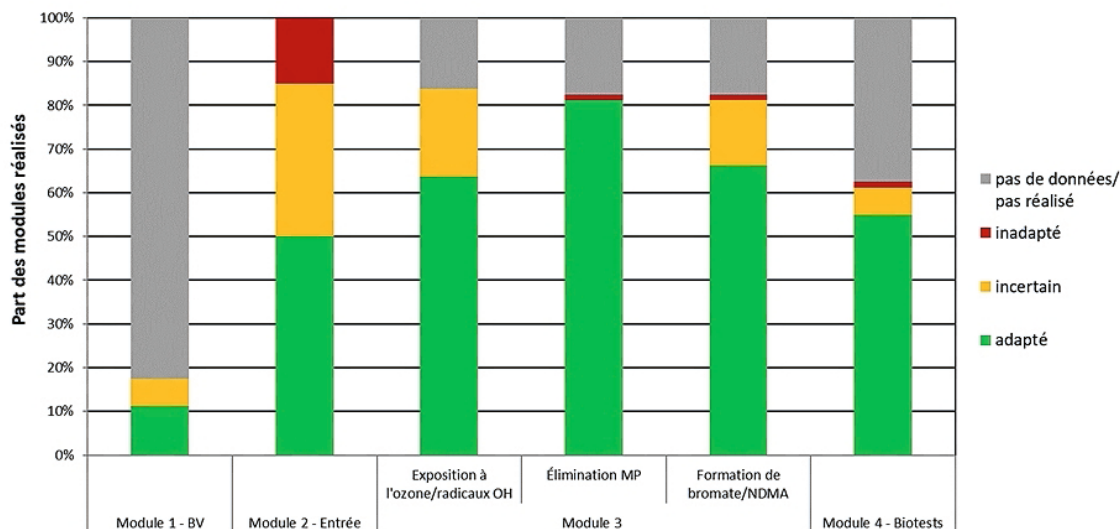


Fig. 2 Vue d'ensemble de la fréquence relative des modules réalisés pour les quelque 100 eaux usées examinées (données: Envilab AG). Le module 2 a été réalisé le plus fréquemment (correspond à 100%). Les couleurs indiquent la classification en «vert/adapté», «rouge/inadapté» et «jaune/incertain». Concernant le module 1: ces vérifications ne sont en règle générale pas effectuées par les laboratoires privés mandatés. Il est supposé que les STEP les réalisent elles-mêmes ou en collaboration avec le bureau de planification mandaté et/ou avec l'autorité d'exécution. Il n'a pas été recensé si le module 1 a été réalisé dans les cas représentés

des modules supplémentaires sont effectués, la proportion d'eaux usées jugées inadaptées ou incertaines diminue. Les eaux usées clairement inadaptées sont en règle générale identifiées dès les modules 2 et 3.

Nous disposons de nettement moins d'informations concernant la réalisation du module 1 «Analyse du bassin versant». Nous partons du principe que les STEP effectuent cette analyse elles-mêmes ou en collaboration avec le bureau de planification mandaté et/ou avec l'autorité d'exécution.

Au final, on peut conclure que les vérifications font leurs preuves et permettent d'identifier de manière fiable les eaux usées inadaptées [8]. Au cours des dernières années, nous avons élargi de manière ciblée les connaissances et renforcé la base décisionnelle pour les vérifications futures, en abordant notamment les questions suivantes:

1. Dans quelle mesure les vérifications en laboratoire pour les aspects chimiques sont-elles représentatives de l'ozonation à grande échelle?
2. Comment évaluer les eaux usées d'une STEP qui développera prochainement son traitement biologique – par exemple en passant d'un traitement biologique de type élimination du carbone à une nitrification – ou qui sera

regroupée avec une ou plusieurs autres STEP?

3. Les STEP équipées d'une ozonation et présentant des concentrations élevées de nitrite dans les effluents montrent-elles une mutagénicité dans l'effluent?

Cet article résume les résultats des trois études ayant examiné ces questions et montre comment les connaissances ainsi acquises ont été intégrées dans les documents existants.

REPRÉSENTATIVITÉ DES ANALYSES CHIMIQUES EN LABORATOIRE

Cette étude s'est penchée sur la question de savoir dans quelle mesure les analyses en laboratoire réalisées dans le cadre du module 3 des vérifications relatives à l'adéquation du processus d'ozonation (voir *fig. 1*) reflètent une installation d'ozonation à grande échelle [9]. L'étude a été menée à partir d'échantillons d'eaux usées de trois STEP équipées d'une ins-

tallation d'ozonation à grande échelle, en se concentrant sur la formation de bromate et de nitrosamines ainsi que sur l'élimination des MP.

Les réacteurs de laboratoire et les installations d'ozonation à grande échelle diffèrent en termes d'injection d'ozone et de concentration locale d'ozone. De plus, d'autres projets ont montré que l'élimination des MP et la formation de bromate peuvent varier entre les systèmes de laboratoire et les installations à grande échelle [10-12].

DÉTAILS SUR LA RÉALISATION DE L'ÉTUDE

Les analyses ont été réalisées à partir d'échantillons d'eaux usées provenant des STEP de Werdhölzli (canton de Zurich), Porrentruy (canton du Jura) et Altenrhein (canton de Saint-Gall; *tab. 1*). Les prélèvements ont été effectués par échantillonnage ponctuel à trois jours différents, à l'entrée et sortie de l'ozonation ainsi qu'à la sortie du filtre en aval de l'ozonation.

L'échantillonnage ponctuel présente

STEP	Dimensionnement	Traitement secondaire	Ozonation en service depuis	Dose d'ozone à l'échantillonnage (gO ₃ /gCOD)
Werdhölzli	650 000 EH	Filtre à sable existant	2018	0,6-0,8
Altenrhein	120 000 EH	Filtre à CAG	2019	0,1-0,2
Porrentruy	25 000 EH	Nouveau filtre à sable	2020	0,6-1,1

Tab. 1 Caractéristiques principales des STEP ayant participé à l'étude.

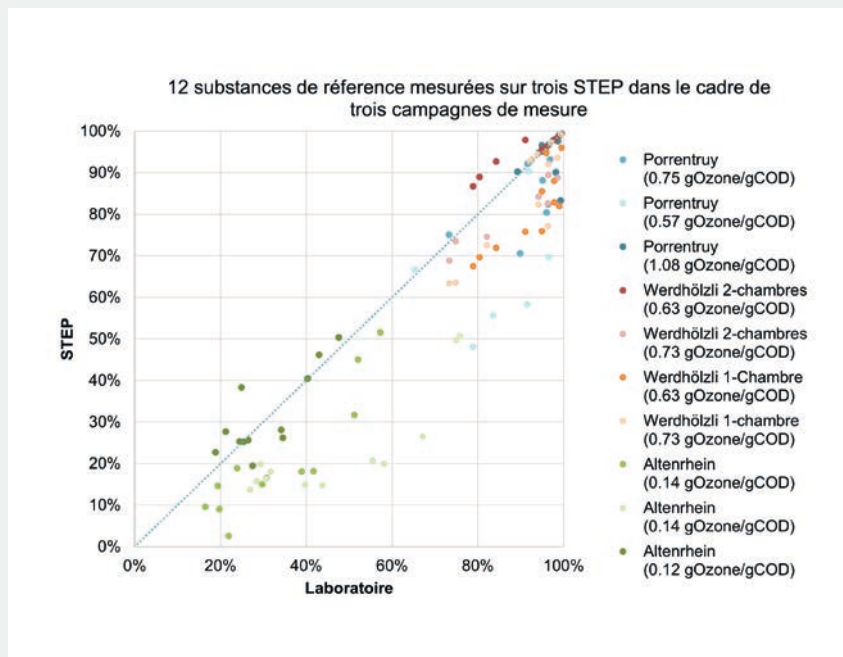


Fig. 3 Comparaison de l'élimination des MP entre le laboratoire et l'ozonation à grande échelle [9].

l'avantage de permettre une détermination plus simple de la dose d'ozone appliquée pendant cette période, et de garantir que le même lot d'eau usée traité dans l'installation d'ozonation pouvait être utilisé pour les analyses en laboratoire. Les prélèvements ont été réalisés par temps sec.

ÉLIMINATION DES MP EN LABORATOIRE SOUVENT SURESTIMÉE

Il a été constaté que l'ozonation en laboratoire élimine tendanciellement mieux les douze substances de référence, utilisées pour vérifier l'efficacité de l'étape de traitement des MP [2], que les installations à grande échelle (fig. 3). Cela pourrait s'expliquer par le fait que, lors des analyses en laboratoire, la concentration initiale en ozone était plus élevée que dans l'installation d'ozonation à grande échelle, ce qui a entraîné une exposition plus importante à l'ozone/aux radicaux •OH.

Comme attendu, une dose d'ozone plus élevée entraîne une meilleure élimination des MP: ceci est particulièrement visible pour la combinaison de procédés de la STEP d'Altenrhein, qui fonctionne avec des doses spécifiques d'ozone nettement plus faibles que les autres STEP étudiées (tab. 1). Les résultats varient toutefois d'une STEP à l'autre ainsi qu'entre les trois campagnes de mesure. Les analyses en laboratoire permettent donc d'estimer l'élimination des MP à grande échelle, mais les valeurs obtenues en laboratoire sont généralement supérieures à celles

de l'ozonation à grande échelle. Cela est surtout marqué pour les faibles taux d'élimination (fig. 3).

FORMATION DE BROMATE EN LABORATOIRE SOUVENT SURESTIMÉE

Le bromate se forme lors de l'ozonation à partir du bromure, possède un potentiel carcinogène et mutagène et n'est pas dégradé dans l'environnement (c'est-à-dire en conditions aérobies) [13]. La formation de bromate dans les installations d'ozonation doit donc rester minimale.

Dans les trois STEP étudiées, les concentrations en bromure à l'entrée de l'ozonation variaient entre 20 et 250 µg/l (fig. 4). D'après l'expérience, la forma-

tion de bromate commence à des doses d'ozone comprises entre 0,3 et 0,5 gO₃/gCOD [13]. À la STEP d'Altenrhein, où l'ozonation était exploitée avec une dose spécifique d'ozone d'environ 0,1-0,2 gO₃/gCOD (tab. 1), aucun bromate n'a été détecté dans les eaux usées traitées après ozonation (fig. 4). Dans les autres STEP étudiées, les concentrations en bromate restaient également inférieures à la valeur de référence de 5 µg/l (selon les vérifications relatives à l'adéquation du processus d'ozonation [4]), malgré des concentrations en bromure parfois élevées et une dose spécifique d'ozone comprise entre 0,6 et 1,1 gO₃/gCOD (fig. 4).

En laboratoire, la formation de bromate était tendanciellement plus élevée que dans les installations d'ozonation à grande échelle étudiées – parfois jusqu'au double. De plus, il est arrivé que la concentration en bromate en laboratoire dépasse la valeur de référence de 5 µg/l (selon [4]), ce qui n'était pas le cas dans l'installation d'ozonation à grande échelle (fig. 4). Cela pourrait s'expliquer par le fait que, lors des analyses en laboratoire, la concentration initiale en ozone était plus élevée que dans l'installation à grande échelle, entraînant une exposition plus importante à l'ozone et aux radicaux •OH.

SITUATION PAS CLAIRE POUR LES NITROSAMINES

Les nitrosamines constituent un groupe de substances dont le N nitrosodiméthylamine (NDMA) est le représentant principal. Elles ont un effet cancérigène et peuvent se former lors de l'ozonation à partir de substances précurseurs. Le

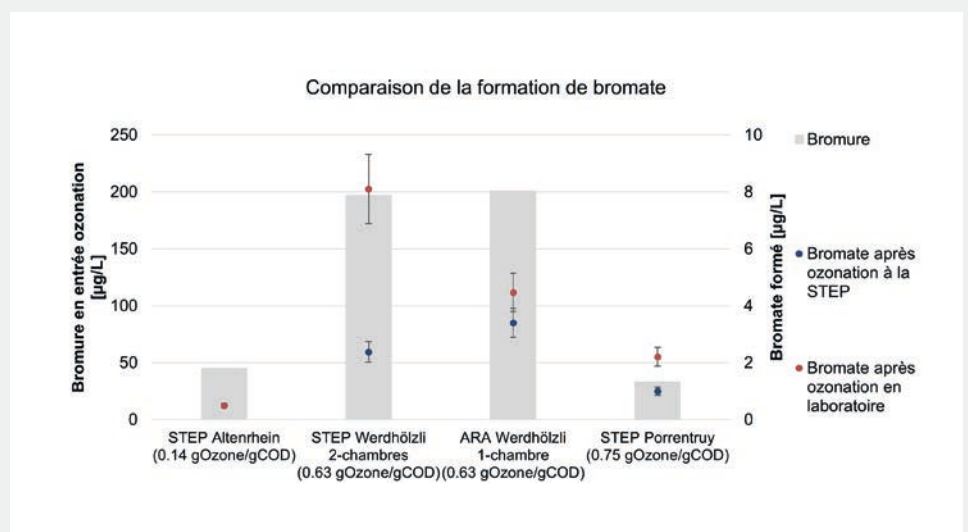


Fig. 4 Formation de bromate en laboratoire et à grande échelle aux STEP d'Altenrhein, Werdhölzli et Porrentruy, à différentes concentrations en bromure et doses spécifiques d'ozone. Source: [9].

traitement secondaire biologiquement actif (p. ex. filtre à sable) dégrade partiellement ou totalement les nitrosamines, contrairement au bromate. Dans le cadre du principe de précaution, la formation de nitrosamines dans les installations d'ozonation doit rester minimale.

Les résultats concernant les nitrosamines n'ont pas permis de tirer des conclusions définitives. Il est toutefois apparu de manière constante que tant le traitement biologique secondaire en laboratoire que celui à la STEP réduisaient à nouveau de manière significative les nitrosamines formées lors de l'ozonation.

Cependant, il y a eu des cas où les nitrosamines ont été détectées soit uniquement dans les échantillons d'eaux usées étudiés en laboratoire, soit uniquement dans l'installation d'ozonation à grande échelle, mais pas dans les deux situations simultanément. Dans d'autres cas, différentes nitrosamines se sont formées en laboratoire par rapport à l'installation à grande échelle.

Il convient de noter que, dans ces études, les concentrations mesurées de nitrosamines se situent dans une gamme très faible et sont donc associées à une incertitude de mesure correspondante. L'analyse dans les eaux usées est très exigeante en raison de la matrice complexe. De plus, les mécanismes de formation des nitrosamines et les substances précurseurs pertinentes ne sont pas encore suffisamment compris et connus. On peut cependant supposer que les nitrosamines ne se forment pas à partir de la matrice des eaux usées, mais à partir de substances précurseurs.

LES VÉRIFICATIONS DE L'OZONATION SONT REPRÉSENTATIVES DES INSTALLATIONS À GRANDE ÉCHELLE

Cette étude a globalement confirmé que les tests en laboratoire sont représentatifs des installations d'ozonation à grande échelle. Les tests en laboratoire éliminent tendanciellement mieux les substances de référence et produisent tendanciellement plus de bromate. Les valeurs de référence concernant le bromure et le bromate – selon les vérifications relatives à l'adéquation du processus d'ozonation [4] – intègrent ainsi un certain facteur de sécurité, ce qui est judicieux étant donné que les concentrations en bromure à l'entrée de la STEP peuvent varier. Les nitrosamines restent importantes pour détecter les anomalies dans la composition des eaux usées et demeurent incluses dans l'évaluation, en particulier en raison de leur pertinence (potentiel cancérigène). Des informations complémentaires sur l'étude sont disponibles dans le rapport de projet [9].

REPRÉSENTATIVITÉ DE LA NITRIFICATION EN LABORATOIRE

Les tests d'adéquation à l'ozonation sont réalisés avec les eaux usées à traiter de la STEP concernée. Cependant, si une STEP prévoit d'étendre ultérieurement son traitement biologique vers une nitrification, la composition des eaux usées change. Cela signifie que la composition actuelle des eaux usées n'est pas représentative de la situation future. Cela concerne également les STEP qui ne réalisent pas elles-mêmes la nitrification, mais qui se-

ront à l'avenir raccordées à une STEP pratiquant la nitrification. Pour reproduire cette situation future à l'avance et évaluer l'adéquation à l'ozonation, les eaux usées doivent être nitrifiées préalablement en laboratoire. L'étude présentée ici a comparé une méthode permettant de simuler la nitrification d'une STEP en laboratoire avec une STEP à grande échelle. La comparaison entre l'installation pilote et la nitrification en laboratoire a été réalisée afin de déterminer si la nitrification en laboratoire suffit pour ce type de vérification ou si une mise en œuvre pilote est nécessaire.

DÉTAILS DE LA RÉALISATION DE L'ÉTUDE

Les investigations ont été menées à la STEP de Langmatt (Mörliken-Wildeggen, canton d'Argovie). Cette STEP dispose d'une filière de traitement spatialement séparée pour l'élimination du carbone – dite «biologie à forte charge» – et d'une filière de nitrification – dite «biologie à faible charge». Parallèlement à la filière de nitrification, une installation pilote en mode SBR a également traité l'effluent issu de la biologie à forte charge (fig. 5). Les vérifications relatives à l'adéquation du processus d'ozonation (modules 3 et 4; fig. 1) ont été réalisées à la fois avec des échantillons de l'effluent de la biologie à forte charge et avec ceux de la filière de nitrification (fig. 5). Cette dernière a servi de référence pour la comparaison avec la nitrification en laboratoire et l'installation pilote exploitée en parallèle. La nitrification en laboratoire a été réalisée en double, c'est-à-dire avec des boues activées provenant de deux STEP différentes (STEP de Langmatt, STEP d'Oltén), chacune avec une concentration en boues de 2 g de matière sèche par litre.

LA NITRIFICATION EN LABORATOIRE REPRÉSENTE BIEN LA STEP

Cela s'est confirmé: la STEP sélectionnée présentait des eaux usées adaptées à l'ozonation. Les résultats concernant l'exposition aux radicaux $O_3/\bullet OH$ (fig. 6), l'élimination des micropolluants et la formation de sous-produits d'oxydation étaient comparables entre l'effluent de la nitrification en laboratoire, celui de l'installation pilote et l'effluent de la nitrification de la STEP. Cela signifie que les eaux usées traitées par nitrification en laboratoire sont représentatives des étapes de nitrification des STEP à grande échelle. Des résultats atypiques – par exemple en

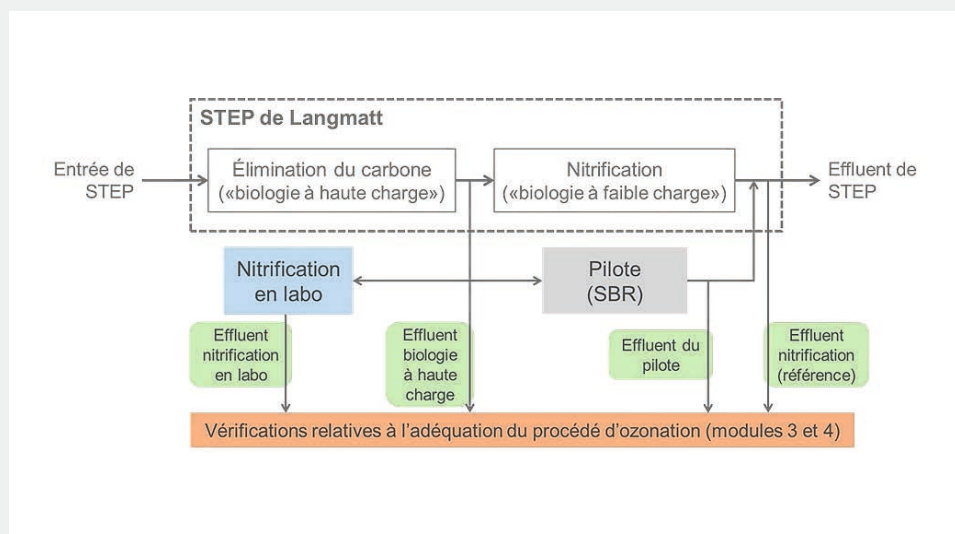


Fig. 5 Vue d'ensemble du montage expérimental (gris), des points de prélèvement (vert) et des analyses réalisées (bleu et orange). Source: [14], adapté.

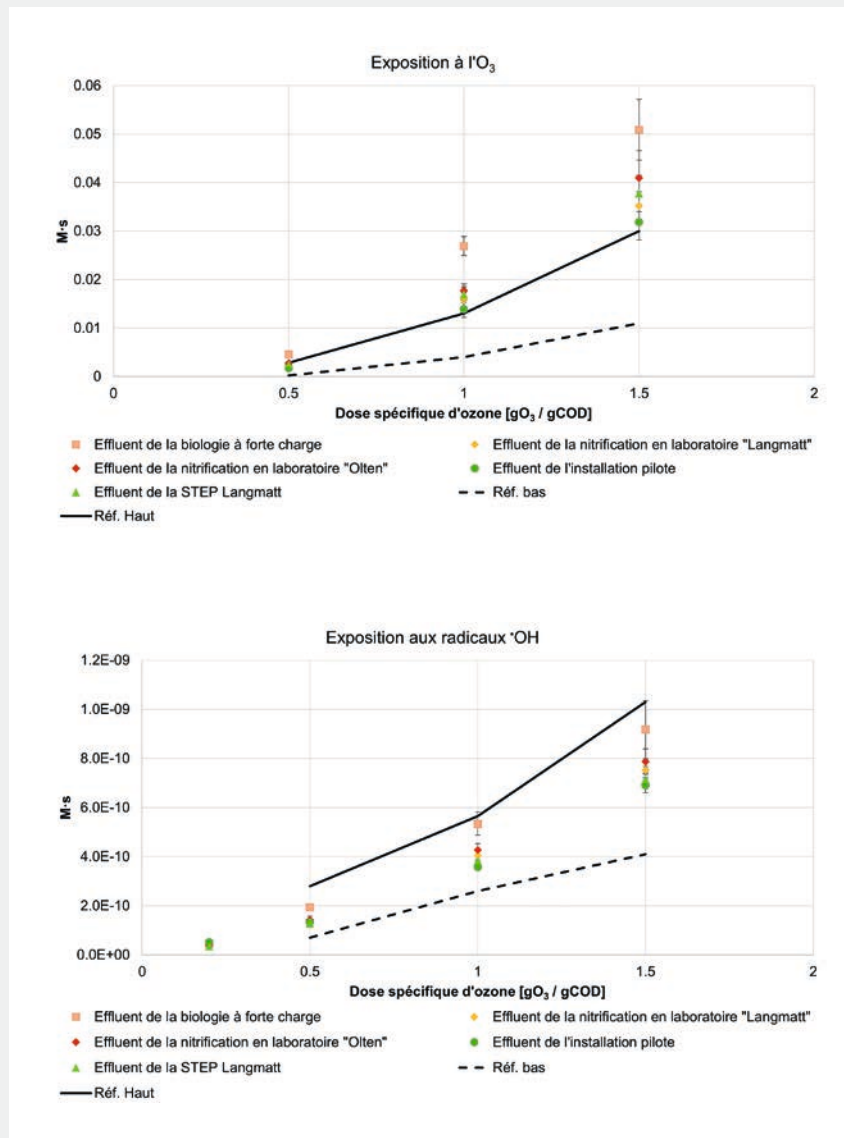


Fig 6. Exposition à l'O₃ (en haut) et aux radicaux •OH (en bas) des cinq échantillons d'eaux usées étudiés. L'effluent du traitement à forte charge présente une exposition à l'O₃ notable, car elle diffère nettement des autres échantillons et se situe bien au-delà de la plage de référence (environ un facteur 2 au-dessus de la plage de référence). Source: [14].

ce qui concerne l'exposition à l'O₃ (environ un facteur 2 au-dessus de la plage de référence) – ont été obtenus avec l'échantillon provenant du traitement à forte charge de la STEP (fig. 6). Cela pourrait être dû aux concentrations élevées de matières organiques dissoutes (COD) de 29 mg/l. L'étude a montré que la nitrification évaluée en laboratoire représente bien la STEP à grande échelle et que la composition des eaux usées n'est pas modifiée de manière significative en ce qui concerne la chimie de l'ozonation. Par conséquent, un pilote supplémentaire n'est pas nécessaire.

La nitrification en laboratoire est recommandée avant les vérifications pour l'ozonation pour les eaux usées présentant plus de 10 mgCOD/l, plus de 0,3 mgNO₂⁻-N/l ou plus de 2 mgNH₄⁺-N/l (valeurs

conformes à l'annexe 3.1 de l'CEaux). Si la STEP atteint, en fonctionnement normal, des valeurs d'effluent plus faibles, un nouvel échantillon d'eaux usées – avec des concentrations correspondantes plus basses – peut être utilisé pour les vérifications relatives à l'adéquation du processus d'ozonation.

Des informations complémentaires sur l'étude sont disponibles dans le rapport de projet [14].

SURVEILLANCE DE LA MUTAGÉNÉCITÉ DANS LES INSTALLATIONS D'OZONATION

Le module 4 des vérifications liées à l'ozonation (fig. 1) utilise des biEssais – notamment le test d'Ames, le test sur Daph-

nies et un test combiné sur algues vertes – pour détecter d'éventuels effets négatifs de produits secondaires d'oxydation encore inconnus sur les organismes vivants. Dans ce cadre, on vérifie principalement comment la toxicité évolue après le traitement par ozonation et après le traitement biologique subséquent. Une éventuelle augmentation de la toxicité après l'ozonation doit être éliminée par le traitement biologique qui suit. Une augmentation de la toxicité est globalement indésirable et constitue une anomalie; dans ce cas, l'ozonation devrait en principe être abandonnée.

Des travaux récents suggèrent que des concentrations de nitrite d'environ 0,3 mgNO₂⁻-N/l et plus dans les eaux usées peuvent favoriser l'apparition de mutagénéicité lors de l'ozonation [15] (voir encadré 2). Actuellement, moins de la moitié des STEP suisses respectent la valeur guide de nitrite de 0,3 mgNO₂⁻-N/l dans l'effluent biologique [16, 17]. Conformé-

GARDER UN ŒIL SUR LES VALEURS DE NITRITE

Des concentrations de nitrite dans les eaux usées traitées supérieures à environ 0,3 mgNO₂⁻-N/l peuvent favoriser l'apparition de mutagénéicité lors de l'ozonation [15]. Il est donc recommandé que la concentration en nitrite à l'entrée de l'ozonation reste inférieure à ce seuil.

Il est conseillé d'analyser à l'avenir l'évolution des concentrations de nitrite dans le cadre des vérifications relatives à l'adéquation du processus d'ozonation (module 2). Dans les cas où des concentrations élevées de nitrite dans l'effluent biologique (>0,3 mgNO₂⁻-N/l) sont observées (notamment de façon récurrente), ces données devraient être prises en compte dans l'évaluation. Pour les modules 3 et 4, il est donc recommandé d'utiliser un échantillon d'eau usée présentant des concentrations de nitrite correspondantes élevées. Une alternative consiste à enrichir l'échantillon d'eau usée en nitrite.

Lors de la surveillance de l'ozonation [7], des investigations supplémentaires concernant la mutagénéicité sont recommandées si des concentrations de nitrite supérieures à 0,3 mgNO₂⁻-N/l apparaissent de manière répétée en entrée d'ozonation. Dans une telle situation, des optimisations opérationnelles de la STEP devraient être mises en œuvre pour réduire les concentrations de nitrite.

STEP		Nitrite [mgN/l]	TA98-S9	TA98+S9	TA100-S9	TA100+S9	YG1041-S9	YG1041+S9	YG1042-S9	YG1042+S9	YG7108-S9	YG7108+S9
STEP N°1	Entrée O ₃	0,086										
	Sortie O ₃											
	Sortie STEP											
STEP N°2	Entrée O ₃	<0,015										
	Sortie O ₃											
	Sortie STEP											
STEP N°3	Entrée O ₃	<0,015										
	Sortie O ₃											
	Sortie STEP											
STEP N°4	Entrée O ₃	0,027										
	Sortie O ₃											
	Sortie STEP											
STEP N°5	Entrée O ₃	0,028										
	Sortie O ₃											
	Sortie STEP											
STEP N°6	Entrée O ₃	<0,015										
	Sortie O ₃											
	Sortie STEP											
STEP N°7	Entrée O ₃	<0,015										
	Sortie O ₃											
	Sortie STEP											
STEP N°8	Entrée O ₃	<0,015										
	Sortie O ₃											
	Sortie STEP											
STEP N°9	Entrée O ₃	0,14										
	Sortie O ₃											
	Sortie STEP											
STEP N°9	Entrée O ₃	0,43										
	Sortie O ₃											
	Sortie STEP											

mutagène pas mutagène potentiellement mutagène Augmentation Diminution inchangé

Fig. 7 Aperçu des résultats des analyses Ames. Les souches Ames utilisées jusqu'ici dans les vérifications de l'adéquation à l'ozonation sont encadrées en bleu. Source: [18].

ment au concept de surveillance du VSA [7], des investigations écotoxicologiques doivent être entreprises lorsqu'il existe un soupçon concret de problèmes, ce qui n'est toutefois pas encore suffisamment pratiqué. Pour répondre à ces incertitudes, la plateforme «Techniques de traitement des micropolluants» a commandé une étude [18] visant à déterminer si une mutagénicité apparaît dans l'effluent de STEP équipées d'une ozonation lorsqu'elles présentent des concentrations élevées de nitrite.

DÉTAILS DE LA RÉALISATION DE L'ÉTUDE

L'étude a examiné les eaux usées de neuf STEP suisses équipées d'une ozonation à grande échelle. Pour chaque STEP, les analyses ont été réalisées sur des échantillons d'eaux usées au point d'entrée et de sortie de l'ozonation, ainsi que sur des eaux usées après le traitement biologique subséquent. La mutagénicité a été déterminée à l'aide du test d'Ames, en utilisant les souches bactériennes établies TA98 et TA100, qui sont déjà utilisées aujourd'hui dans le cadre des vérifications liées à

l'ozonation. Parallèlement, des analyses ont également été effectuées avec les souches plus récentes YG1041, YG1042 et YG7108, qui sont nettement plus sensibles que les souches standard et couvrent un spectre de substances plus large [19]. Des échantillons d'eaux usées avec des concentrations faibles et élevées de nitrite (> 0,3 mg NO₂-N/l) ont été analysés.

LES VÉRIFICATIONS SUR L'OZONATION SONT CONCLUANTES POUR LA MUTAGÉNITÉ

À l'exception d'un cas, toutes les STEP examinées présentaient, à l'entrée de l'ozonation, une mutagénicité qui était réduite par le traitement par ozonation et

n'était plus détectable après le traitement biologique subséquent (fig. 7). Le génotype TA98 a indiqué une mutagénicité dans six échantillons à l'entrée de l'ozonation et, de manière isolée, aussi après l'ozonation, qui a ensuite été éliminée par le traitement biologique. Le génotype TA100 n'a présenté aucun effet mutagène dans les échantillons d'entrée d'ozonation étudiés.

Les souches bactériennes établies TA98 et TA100 n'ont montré aucune mutagénicité dans les effluents finaux des STEP examinées. Les résultats obtenus sur les installations à grande échelle sont ainsi cohérents avec ceux issus de la procédure

Module	Compléments apportés au document
3	• Intégration de la méthodologie pour la réalisation de la nitrification en laboratoire.
3 und 4	• La compensation du nitrite pour le dosage de l'ozone reste inchangée, indépendamment de la nitrification en laboratoire.
4	• La souche TA100 n'est plus recommandée à l'avenir, car elle est trop peu sensible. • Lors des futures investigations sur l'adéquation à l'ozone, les trois souches YG (YG1041, YG1042, YG7108) doivent être mesurées. Cependant, elles ne constituent actuellement pas un critère de décision.

Tab. 2 Vue d'ensemble des compléments apportés à la procédure standard de travail (SOP).

Module	Compléments apportés au document
2	<ul style="list-style-type: none"> Analyser les concentrations de nitrite en entrée de l'ozonation prévue. La valeur de référence pour l'évaluation est de 0,3 mgNO₂⁻-N/l.
2 et 3	<ul style="list-style-type: none"> Les valeurs d'évaluation concernant le bromure et le bromate restent inchangées. Elles intègrent un certain facteur de sécurité (les analyses en laboratoire tendent à surestimer la formation de bromate), ce qui est judicieux, car les concentrations de bromure à l'entrée des STEP peuvent fluctuer. Les nitrosamines restent incluses dans l'évaluation, car elles sont cancérigènes et que les mécanismes de formation ainsi que les substances précurseurs ne sont pas suffisamment compris.
3 et 4	<ul style="list-style-type: none"> La compensation du nitrite pour le dosage de l'ozone reste inchangée, indépendamment de la nitrification en laboratoire. Le nitrite doit être pris en compte dans l'évaluation en cas de concentrations élevées (récurrentes) à l'effluent (>0,3 mgNO₂⁻-N/l) conformément aux analyses du module 2. Dans ces cas, un échantillon d'eaux usées avec des concentrations de nitrite correspondantes doit être utilisé pour les modules 3 et 4. Alternativement, l'échantillon peut également être enrichi en nitrite..
3 et 4	<ul style="list-style-type: none"> Réalisation d'une nitrification en laboratoire pour les STEP qui ne nitrifient pas encore actuellement, mais le feront à l'avenir si le COD > 10 mg/l, ou les nitrites > 0,3 mg N/l, ou l'ammonium > 2 mg N/l, et si la STEP atteint à l'avenir des valeurs plus basses de manière stable.
4	<ul style="list-style-type: none"> La souche TA100 n'est plus recommandée à l'avenir, car elle est trop peu sensible. Lors des futures investigations sur l'adéquation à l'ozone, les trois souches YG (YG1041, YG1042, YG7108) doivent être mesurées. Cependant, elles ne constituent actuellement pas un critère de décision.
Interprétation pour les eaux usées dont l'adéquation est incertaine	<ul style="list-style-type: none"> Pour les eaux usées dont l'adéquation à l'ozonation est incertaine, mais pour lesquelles l'ozonation est nécessaire en raison de l'annexe 2 Œaux, il faut dans tous les cas démontrer qu'aucun produit de réaction problématique ne se forme dans avec les différents états d'exploitation de la STEP. Des modes de fonctionnement adaptés ou des combinaisons de différentes méthodes peuvent être utilisés à cet effet.

Tab. 3 Vue d'ensemble des compléments apportés à la recommandation «Vérification relatives à l'adéquation du processus d'ozonation».

Module	Compléments apportés au document
Analyses en entrée d'ozonation	<ul style="list-style-type: none"> Analyser les concentrations de nitrite à l'entrée de l'ozonation. La valeur de référence pour l'évaluation est de 0,3 mgNO₂⁻-N/l. Si les concentrations de nitrite sont (de manière récurrente) supérieures à cette valeur, des investigations supplémentaires concernant la mutagénicité sont recommandées. Les valeurs d'évaluation concernant le bromure et le bromate restent inchangées. Elles intègrent un certain facteur de sécurité, ce qui est judicieux, car les concentrations de bromure à l'entrée des STEP peuvent fluctuer. Les nitrosamines restent incluses dans l'évaluation, car elles sont cancérigènes et que les mécanismes de formation ainsi que les substances précurseurs ne sont pas suffisamment compris.
Sous-produits toxiques inconnus	<ul style="list-style-type: none"> La souche TA100 n'est plus recommandée à l'avenir, car elle est trop peu sensible. Les trois souches YG (YG1041, YG1042, YG7108) pourraient dorénavant être mesurées. Cependant, elles ne constituent actuellement pas un critère de décision.

Tab. 4 Vue d'ensemble des compléments apportés à la recommandation «Exploitation d'une ozonation dans une STEP: Reconnaître des développements critiques dans le bassin versant».

d'essai d'ozonation selon la recommandation VSA (non illustrés ici).

Les investigations ont confirmé que les souches YG1041 et YG1042 sont plus sensibles et/ou couvrent un spectre de substances plus large que les souches TA98 et TA100 utilisées jusqu'à présent: lorsqu'une mutagénicité était détectée par la souche TA98, le génotype YG1041 le faisait aussi. De plus, les souches YG1041 et YG1042 ont parfois révélé une mutagénicité dans des échantillons d'eaux usées où les souches TA ne l'avaient pas détectée. De même, la souche YG7108 a indiqué, contrairement aux souches TA, une mutagénicité dans l'eau ozonée de trois STEP. Toutefois, cette mutagénicité a également été éliminée par le traitement biologique.

Il est recommandé d'inclure à l'avenir les trois souches YG (YG1041, YG1042, YG7108) dans les analyses de mutagénicité lors des vérifications d'adéquation à l'ozonation. Cependant, elles ne constituent actuellement pas un critère décisionnel dans le cadre des vérifications de

l'adéquation au processus d'ozonation, car les données disponibles sont encore insuffisantes et leur application en pratique n'est pas assez établie. L'objectif est donc d'étendre la base de données au cours des prochaines années. À cette fin, la plateforme «Techniques de traitement des micropolluants» compile et analyse les données recueillies.

Des informations complémentaires sur l'étude sont disponibles dans le rapport de projet [18].

SIGNIFICATION POUR LES VÉRIFICATIONS FUTURES

Les connaissances tirées des études décrites ci-dessus ont été intégrées dans les documents qui suivent:

- SOP: Procédure de la vérification relatives à l'adéquation du processus d'ozonation (2017, révisée en 2026; [6])
 - compléments apportés au document selon le *tableau 2*.
- Recommandation VSA «Vérifications relatives à l'adéquation du processus

REMERCIEMENTS

Nous remercions l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) pour son soutien financier et les STEP pour leur participation aux enquêtes. La rédaction de cet article a été réalisée dans le cadre d'un groupe d'accompagnement technique. Un grand merci est adressé aux personnes suivantes: *Urs von Gunten* et *Adriano Joss* (Eawag), *Saskia Zimmermann-Steffens* (OFEV), *Christian Abegglen* (ERZ), *Michael Mattle* (Holinger AG), *Edith Durisch-Kaiser* und *Christian Götz* (AWEL), *Miriam Langer* (FHNW et Eawag), *Cornelia Kienle* (Centre écotox), *Sergio Santiago* (Soluval Santiago), *Jonas Margot* (RWB), *Jakob Helbing* (WVZ), *Sebastian Buchinger* (BFG) et *Fabienne Eugster* (VSA).

d'ozonation» (2017, révisée en 2026; [4])

- compléments apportés au document selon le *tableau 3*.

- Recommandation VSA «Exploitation d'une ozonation dans une STEP: Reconnaître des développements critiques

dans le bassin versant» (2021, révisée en 2026; [7]) – compléments apportés au document selon le *tableau 4*.

Les documents ainsi mis à jour sont disponibles sur le site web de la plateforme «Techniques de traitement des micropolluants» (www.micropoll.ch).

CONCLUSIONS

Les enseignements suivants peuvent être tirés de l'article présenté:

- Il est essentiel de vérifier l'adéquation d'une ozonation, tant dans le cadre du choix du procédé que dans le cadre de la surveillance, afin de garantir une protection appropriée des eaux. L'approche modulaire a fait ses preuves.
- La comparaison entre les essais en laboratoire et les installations d'ozonation à grande échelle a montré que les tests en laboratoire éliminent tendanciellement mieux les substances de référence et produisent également tendanciellement plus de bromate, tout en représentant globalement bien l'installation à grande échelle. Par conséquent, les valeurs d'évaluation relatives au bromure et au bromate comportent un certain facteur de sécurité, ce qui est pertinent étant donné que les concentrations en bromure en entrée de STEP peuvent varier.
- La nitrification en laboratoire évaluée représente bien la STEP à grande échelle et ne modifie pas de manière significative la composition des eaux usées en ce qui concerne les vérifications d'adéquation à l'ozonation. Elle est recommandée avant les tests d'ozonation pour les eaux usées présentant plus de 10 mg COD/l, plus de 0,3 mg NO₂⁻-N/l ou plus de 2 mg NH₄⁺-N/l.
- Des études supplémentaires sur des ozonations à grande échelle ont confirmé qu'aucune mutagénicité n'apparaît dans les effluents, comme l'avaient indiqué les essais en laboratoire. Le nitrite peut influencer la formation de mutagénicité et devrait donc être maintenu en dessous de 0,3 mg NO₂⁻-N/l en entrée d'ozonation. Si, malgré des optimisations opérationnelles de la STEP, les concentrations de nitrite restent élevées, des investigations complémentaires concernant la mutagénicité sont recommandées.

– Des souches *Ames* plus sensibles sont désormais disponibles, mais ne doivent pas encore être intégrées dans le processus décisionnel, car la base de données est insuffisante et elles ne sont pas encore suffisamment établies dans la pratique. Il est recommandé de les inclure lors de futures évaluations afin d'élargir la base de données au cours des prochaines années.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Gulde, R. et al. (2024): *Médicaments dans les eaux – Mesures nécessaires dans plus des STEP*. Article traduit d'Aqua & Gas, 3/2024
- [2] Wunderlin, P.; Gulde, R.; Bosshard, J. (2024): *Éliminations des MP dans les eaux ménagères – Enseignements tirés de sept années de vérification du taux d'épuration*. Article traduit d'Aqua & Gas 1/2024
- [3] Schindler Wildhaber, Y.; Mestankova, H.; von Gunten, U. (2014): *Testverfahren zur Beurteilung der Behandelbarkeit von Abwasser mit Ozon*. Eawag, Dübendorf
- [4] *Recommandation VSA (2017, révisée en 2026 – Version 3)*. Vérifications relatives à l'adéquation du processus d'ozonation
- [5] Schindler-Wildhaber, Y. et al. (2015): *Novel test procedure to evaluate the treatability of wastewater with ozone*. *Water Research*: 75: 324–335. DOI: 10.1016/j.watres.2015.02.030
- [6] Envilab AG (2021, adapté 2026 – Version 3): *Testverfahren zur Beurteilung der Behandelbarkeit von Abwasser mit Ozon – Anleitung*
- [7] *Recommandation VSA (2021, révisée en 2026 – Version 2)*. Exploitation d'une ozonation dans une STEP: Reconnaître des développements critiques dans le bassin versant
- [8] Grelot, J.; Wunderlin, P.; Bleny, H. (2020): *Abklärungen Verfahrenseignung Ozonung: Erkenntnisse aus mehrjährigen Erfahrungen*. *Aqua & Gas* 10/2020: 48–57
- [9] Piazzoli, A. et al. (2022): *Beurteilung Repräsentativität Abklärungen Verfahrenseignung Ozonung*. *Studie im Auftrag des Bundesamts für Umwelt (BAFU)*. Dübendorf und Zofingen
- [10] Zietzschmann, F. et al. (2018): *TestTools – Entwicklung und Validierung von schnellen Testmethoden zum Spurenstoffverhalten in technischen und natürlichen Barrieren des urbanen Wasserkreislaufs*. Gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung
- [11] Zimmermann, S. et al. (2011): *Kinetic assessment and modeling of an ozonation step for full-scale municipal wastewater treatment: Micropollutant oxidation, by-product formation and disinfection*. *Water Research* 45: 605–617
- [12] Abegglen, C. et al. (2009): *Ozonung von gereinigtem Abwasser – Schlussbericht Pilotversuch Regensdorf*. *Studie der Eawag im Auftrag*
- [13] Soltermann, F. et al. (2016): *Bromid im Abwasser: Bromatbildung bei der Ozonung – Einschätzung der zukünftigen Situation*. *Aqua & Gas* 10/2016: 64–71
- [14] Piazzoli, A.; Christe, S. (2024): *Beurteilung der Nitrifikation im Labor bei den Abklärungen Verfahrenseignung Ozonung*. *Studie im Auftrag des BAFU*. Zofingen
- [15] Manasfi, T. et al. (eingereicht): *Nitrite oxidation during ozonation revisited: Mechanisms of nitration reactions*. *Environmental Science Technology*
- [16] *Fachhochschule Nordwestschweiz (2024): Gesamtbetrachtung Weiterentwicklung Reinigungsleistung ARA – Grundlage zur Umsetzung der Motionen 20.4261 und 20.4262*. Bern und Muttenz: FHNW, Institut für Ecopreneurship. *Studie im Auftrag des Bundesamts für Umwelt (BAFU)*
- [17] Gulde, R.; Wunderlin, P. (2025). *Rapport succinct sur le nitrite dans les eaux usées épurées – Protection des eaux: la valeur de rejet du nitrite examinée à la loupe*. VSA, Glattbrugg
- [18] Piazzoli, A.; Christe, S. (2024): *Bestimmung der Mutagenität mittels Ames-Test*. *Studie im Auftrag des VSA*. Dübendorf und Zofingen
- [19] Buchinger, S. (2022): *Use of diagnostic strains in the Ames-test – Background and application*. *Workshop zu den Ökotoxikologischen Untersuchungen von ozonierten Abwässern*: Bundesanstalt für Gewässerkunde

> FORTSETZUNG ZUSAMMENFASSUNG

Drittens bestätigten weitere Untersuchungen, dass durch die gross-technischen Ozonungen keine Mutagenität gebildet wird – so wie es die vorgängigen Labortests ergeben hatten. Nitrit sollte im Zulauf zur Ozonung aber unter zirka 0,3 mg NO₂⁻-N/l liegen, weil sonst die Mutagenität allenfalls doch erhöht werden kann. Liegen die Nitritkonzentrationen darüber, sollten diese daher mittels entsprechender ARA-Betriebsoptimierungen reduziert werden. Andernfalls sind zusätzliche Abklärungen bezüglich Mutagenität empfohlen. Die Analytik entwickelt sich auch bezüglich Mutagenität weiter: Neuere, sensitivere Ames-Stämme sind verfügbar und sollen bei künftigen Abklärungen miterfasst werden, um die Datengrundlage in den nächsten Jahren zu erweitern. Aufgrund der nicht ausreichenden Datengrundlage sollen sie aber noch nicht in die Entscheidungsfindung einfließen.