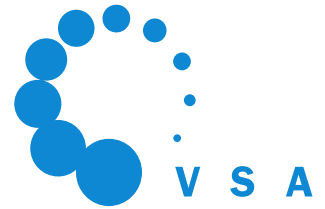


Verband Schweizer
Abwasser- und
Gewässerschutz-
fachleute

Association suisse
des professionnels
de la protection
des eaux

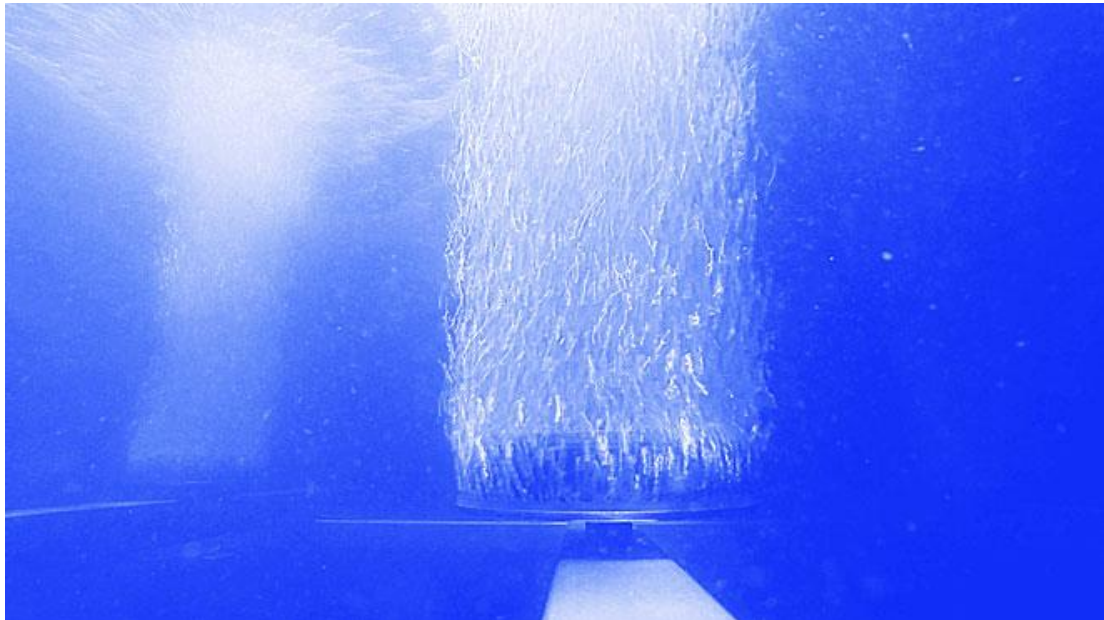
Associazione svizzera
dei professionisti
della protezione
delle acque

Swiss Water
Association



VERIFICATIONS RELATIVES A L'ADEQUATION DU PROCESSUS D'OZONATION

Recommandation



Mentions légales

La présente publication a été élaborée avec le plus grand soin et en toute bonne foi. Cependant, nous ne pouvons offrir aucune garantie concernant l'intégralité, l'exactitude et l'actualité du contenu. Toute prétention en responsabilité pour dommages matériels ou immatériels consécutifs à l'utilisation de la présente publication est exclue.

Auteurs

Pascal Wunderlin, Plateforme VSA « Techniques de traitement des micropolluants », Glattbrugg
Simon Bitterwolf, Plateforme VSA « Techniques de traitement des micropolluants », Glattbrugg

Équipe de projet

Christian Abegglen, ERZ, Zürich
Hélène Bleny, OFEV, Ittigen
Edith Durisch-Kaiser, AWEL, Zürich
Christian Götz (auparavant Envilab), actuellement AWEL, Zürich
Jakob Helbing, WVZ, Zürich
Adriano Joss, Eawag, Dübendorf
Cornelia Kienle, Oekotoxzentrum, Dübendorf
Lubomira Kovalova, AWEL, Zürich
Miriam Langer (auparavant Oekotoxzentrum), actuellement FHNW, Muttenz & Eawag, Dübendorf
Jonas Margot, RWB, Yverdon
Andreas Peter, WVZ, Zürich
Alessandro Piazzoli, Envilab AG, Zofingen
Sergio Santiago, Soluval, Couvet
Fabian Soltermann (Eawag auparavant), actuellement OFEV, Ittigen
Urs von Gunten, Eawag, Dübendorf
Mirco Weil, ECT Oekotoxikologie GmbH, Francfort
Saskia Zimmermann-Steffens, OFEV, Ittigen

Éditeur

Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute
Association suisse des professionnels de la protection des eaux
Associazione svizzera dei professionisti della protezione delle acque

Photo de titre

ARA Neugut, www.neugut.ch

Source

VSA, Europastrasse 3, Postfach, CH-8152 Glattbrugg,
Telefon 043 343 70 70, sekretariat@vsa.ch, www.vsa.ch

9 février 2021, Version 2

Les modifications du contenu sont présentées et justifiées ci-dessous. Les modifications dans le texte ont été notées en "rouge" à l'endroit approprié.

Les aspects suivants doivent être soulignés:

- **Exploiter davantage le potentiel de l'étude du bassin versant** : Une étude systématique du bassin versant est une partie importante des vérifications et devrait être davantage utilisée dans les projets futurs. En plus des indications sur les rejets potentiellement problématiques, on peut en déduire des aspects importants pour l'échantillonnage et sa représentativité.
- **Élargir la base de la prise de décision** : Pour faciliter l'interprétation des résultats des modules 2 et 3, la base de décision est concrétisée comme suit. Les eaux usées sont à considérer comme non-suspectes si :
 - Concentration de nitrosamines (tot) à l'entrée de l'ozonation planifiée < 50 ng/L
 - Formation de nitrosamines (tot) < 50 ng/L pour toutes les doses d'ozone testées
 - Formation de bromate < 5 µg/L à 0.5 mg O₃/mg COD
- **Ajustements techniques** : Les ajustements techniques suivants ont été effectués :
 - Module 2 : Étude des concentrations de bromure en entrée de l'ozonation planifiée sur la base d'échantillons composites de 5 jours (en variant le premier jour d'échantillonnage) et de quelques échantillons journaliers
 - Module 2 : Les mesures du chrome en entrée de l'ozonation planifiée sont rendus facultatifs.
 - Module 3 : Tester également une dose spécifique d'ozone de 0.2 mg O₃/mg COD.
 - Module 4 : Réalisation des biotests avec des échantillons traités avec une dose d'ozone spécifique de 0.5 mg O₃/mg COD

Il convient de souligner que les modules 3 et 4 sont basés sur un échantillon composite de 5 jours. La représentativité de cet échantillon est donc essentielle. Pour un simple bassin versant communal, une exécution simple ou double de ces modules peut être suffisante, alors que cela n'est probablement pas le cas si la composition des eaux usées est très variable. Il est essentiel que les principaux responsables des rejets dans le bassin versant soient connus.

Janvier 2026, version 3

Les principaux aspects qui permettent d'améliorer encore les bases décisionnelles sont mis en évidence ci-après. Les adaptations apportées au texte sont indiquées aux endroits correspondants en « bleu ».

- Module 2 : l'analyse des concentrations en nitrite en entrée d'une ozonation prévue est recommandée. La valeur d'évaluation est fixée à 0,3 mg NO₂⁻-N/L.
- Modules 2 et 3 : les valeurs d'évaluation relatives au bromure et au bromate sont maintenues, bien que les essais de laboratoire tendent à surestimer la formation de bromate. Les valeurs d'évaluation intègrent ainsi un certain facteur de sécurité, les concentrations en bromure en entrée de la STEP pouvant fluctuer. Les nitrosamines restent incluses dans l'évaluation, car elles sont cancérigènes et que tant les mécanismes de formation que les substances précurseurs sont insuffisamment connus.
- Modules 3 et 4 : la compensation du nitrite demeure, indépendamment de la nitrification en laboratoire. En cas de concentrations élevées (récurrentes) en sortie (> 0,3 mg NO₂⁻-N/L), le nitrite doit être pris en compte dans l'évaluation (conformément aux analyses du module 2). Dans de tels cas, un échantillon d'eaux usées présentant des concentrations en nitrite autant élevées doit être utilisé pour les modules 3 et 4. Alternativement, l'échantillon d'eaux usées peut également être enrichi en nitrite.
- Modules 3 et 4 : réalisation d'une nitrification en laboratoire pour les STEP qui ne nitrifient pas encore actuellement, mais qui le feront à l'avenir – si le COD > 10 mg/L, ou nitrite > 0,3 mg NO₂⁻-N/L, ou

ammonium > 2 mg NH₄⁺-N/L et que la STEP atteindra à l'avenir de manière stable des valeurs plus basses.

- Module 4 : la souche TA100 n'est désormais plus recommandée, car elle n'est pas assez sensible. Dans les investigations futures, les trois souches YG (YG1041, YG1042, YG7108) devraient être analysées. Toutefois, elles ne constituent actuellement pas un critère décisionnel.
- Évaluation des eaux usées dont l'adéquation à l'ozonation est incertaine : pour les eaux usées dont l'adéquation à l'ozonation est incertaine, mais pour lesquelles une ozonation est requise conformément à l'annexe 2 de l'OEaux, il convient dans tous les cas de démontrer qu'aucun produit de réaction problématique ne se forme avec les différents états d'exploitation de la STEP. À cette fin, des modes d'exploitation adaptés ou des combinaisons de différents procédés peuvent être mis en œuvre.

RÉSUMÉ

Avec une étape de traitement supplémentaire visant à éliminer les micropolluants, un large spectre de substances est éliminé des eaux usées et la qualité de l'eau est ainsi améliorée de manière significative. Parmi les procédés qu'il est possible d'appliquer, l'adsorption sur charbon actif ou l'ozonation sont actuellement disponibles. Nous savons que certaines eaux usées ne conviennent pas à un traitement par ozonation, notamment en cas de rejets importants d'eaux usées industrielles ou artisanales. Dans de tels cas, des sous-produits d'oxydation indésirables peuvent être formés à des concentrations élevées, ce qui doit être évité. Par conséquent, il convient d'examiner suffisamment tôt, au cas par cas, si des eaux usées spécifiques conviennent à un traitement par ozonation. En plus des autres aspects, tels que les coûts ou la consommation d'énergie, ce point constitue une condition limite importante pour assurer une protection efficace des cours d'eau et doit être pris en compte dans le choix du procédé.

La marche à suivre pour effectuer ces vérifications est décrite en détail ci-après. Les analyses sont effectuées en plusieurs étapes et se répartissent dans les catégories suivantes:

- (1) Etude du bassin versant
- (2) Mesures à l'entrée de l'ozonation planifiée
- (3) Analyses en laboratoire
- (4) Bioessais

Sur la base de l'étude générale du bassin versant, les analyses deviennent de plus en plus spécifiques, afin de pouvoir interrompre les vérifications à tout moment en cas d'eaux usées inappropriées et ainsi économiser des coûts.

Cette recommandation s'adresse à tous les acteurs impliqués dans le choix du procédé dans le cadre d'un projet d'extension.

CONTENU

Résumé	5
1 Contexte	8
2 Conditions cadres légales	8
3 Contexte: sous-produits d'oxydation	8
4 Acteurs impliqués: qui fait quoi et qui paie?	10
5 Coûts et temps d'exécution	12
6 Marche à suivre et aspects à contrôler	12
6.1 Remarques générales concernant l'interprétation des analyses	12
6.2 Bref descriptif des analyses	13
6.3 Module 1: Etude du bassin versant	14
6.4 Module 2: Mesures à l'entrée de l'ozonation planifiée	16
6.5 Module 3 : Analyses en laboratoire	19
6.6 Module 4: Bioessais	22
7 Représentativité de l'échantillon et fréquence de l'exécution	23
8 Évaluation finale	24
9 Analyses complémentaires	25
10 Surveillance de la composition des eaux usées pour les STEP avec ozonation	25
11 Collecte centralisée et stockage des données	26
12 Renseignement en cas de questions et de doutes	26

13	Annexe 1 – Sources de bromure	27
14	Annexe 2 – Résumé des différents modules	28
15	Bibliographie	29

1 CONTEXTE

Le traitement des eaux usées par ozonation élimine les micropolluants, contribuant à améliorer de manière significative la qualité de l'eau (p. ex. Kienle et al., 2015). D'autres effets positifs sont observés, notamment la décoloration des eaux usées et l'inactivation partielle des germes. Mais en cas de charge spéciale, par exemple en raison de rejets importants d'eaux usées industrielles ou artisanales, des substances problématiques, appelées sous-produits d'oxydation, peuvent être formées par ozonation. Par conséquent, il convient d'examiner suffisamment tôt, au cas par cas, si des eaux usées spécifiques conviennent à un traitement par ozonation. Pour les eaux usées qui ne conviennent pas à un traitement par ozonation, un procédé alternatif (p. ex. procédé basé sur le charbon actif) doit être réalisé. Pour les procédés de traitement au charbon actif, aucune analyse comparable permettant de vérifier l'adéquation du procédé n'est nécessaire.

Recommandation du VSA

Le VSA recommande de réaliser ces vérifications de manière anticipée et exhaustive lorsqu'une ozonation est envisagée. Si les eaux usées se révèlent être inappropriées et que l'ozonation est écartée, les vérifications peuvent être interrompues de manière anticipée.

2 CONDITIONS CADRES LÉGALES

Lors des vérifications, les bases légales suivantes s'appliquent: art. 3 de la loi sur la protection des eaux (LEaux ; devoir de diligence) et art. 6 LEaux (interdiction de polluer). Ces articles indiquent qu'il est interdit d'introduire dans une eau des substances susceptibles de causer des atteintes nuisibles ou de nature à polluer l'eau. **Ainsi, le traitement d'eaux usées par ozonation ne doit pas former de nouvelles substances problématiques (sous-produits d'oxydation) de manière excessive (= minimisation de la formation des substances indésirables).** Cette évaluation ne se base pas sur les exigences existantes en matière de sous-produits d'oxydation connus (p. ex. valeurs maximales pour l'eau potable, exigences relatives à la qualité environnementale, etc.).

Par conséquent, les vérifications décrites dans ce document doivent être considérées comme faisant partie intégrante de la preuve d'adéquation du procédé technique prévu (dans le sens d'une planification adéquate imposée par l'art. 63 LEaux). Le procédé à mettre en œuvre doit assurer une protection efficace des eaux et être conforme à l'état de la technique (aide à l'exécution «Financement des mesures», voir également Dominguez et al., 2016).

3 CONTEXTE: SOUS-PRODUITS D'OXYDATION

Lors d'une ozonation, les composés traces sont transformés sous l'effet de l'ozone et des radicaux libres OH. Généralement, ces **produits de transformation**¹ non problématiques des composés traces sont sans effet ou présentent des effets beaucoup plus faibles que la substance initiale. Parallèlement à la transformation des composés traces (formation de produits de transformation), d'autres substances organiques et inorganiques contenues dans les eaux usées sont également oxydées. Celles-ci peuvent former des **sous-produits d'oxydation** présentant une toxicité élevée. La plupart de ces sous-produits sont de nouveau éliminés lors de l'étape de post-traitement biologiquement actif, comme par exemple les aldéhydes, cétones ou acides organiques (Lee und von Gunten, 2016). Lors du traitement par ozonation d'eaux usées non appropriées, différents sous-produits d'oxydation problématiques (potentiellement toxiques) et insuffisamment éliminés lors du post-traitement peuvent être formés.

Concernant les sous-produits d'oxydation problématiques (potentiellement toxiques), deux aspects sont distingués: (i) sous-produits d'oxydation connus, qui peuvent être décelés et quantifiés chimiquement (bromate ou nitrosamine) et (ii) sous-produits d'oxydation inconnus, dont les effets (éco)toxicologiques négatifs (effets combinés) peuvent être décelés par des bioessais (fig. 1). Ces sous-produits d'oxydation sont abordés en détail ci-après:

¹ **Produits de transformation**: formés par l'oxydation des composés traces organiques; **sous-produits d'oxydation**: formés par des réactions avec la matrice des eaux usées (p. ex. bromate, NDMA); **produits de réaction**: produits d'oxydation et de transformation - pour les eaux usées communales, il est supposé que les sous-produits d'oxydation sont plus pertinents que les produits de transformation du point de vue (éco)-toxicologique (Lee et von Gunten, 2016)

- **Bromate:** le bromate est formé lors l’ozonation à partir du bromure, une dose plus élevée d’ozone entraînant généralement une augmentation de la formation de bromate (Soltermann et al., 2016a, 2016b). Le bromate a un effet potentiellement cancérigène. Pour l’eau potable, la valeur maximale s’élève à 10 µg/l (DFI, 2017). La norme de qualité environnementale proposée est de 50 µg/l (Centre Ecotox, 2015). Dans l’environnement (c’est-à-dire en conditions aérobies), le bromate n’est plus éliminé et devient donc une substance durable et persistante.

Les exigences susmentionnées ne servent pas de base à l’évaluation dans les vérifications qui suivent.

Il s’agit plutôt ici d’appliquer l’interdiction de polluer (art. 6 LEaux). La formation de bromate doit donc être réduite au minimum.

- **Nitrosamines:** les nitrosamines comprennent un groupe de substances ayant comme principal représentant la nitrosodiméthylamine (NDMA). Ils ont un pouvoir cancérigène. Des nitrosamines peuvent être formées pendant l’ozonation à partir de précurseurs [ou peuvent déjà être présentes dans les eaux usées avant l’ozonation et fournir des indications sur des rejets industriels](#). La valeur de référence recommandée par l’OMS pour l’eau potable s’élève à 100 ng/L (OMS, 2008), tandis que l’obligation d’annonce en Californie est de 10 ng/l (CDPH, 2009). Contrairement au bromate, la NDMA peut être partiellement ou totalement éliminée dans des conditions aérobies (p. ex. lors du traitement biologique aval).

L’interdiction de polluer s’applique ici aussi (art. 6 LEaux): la formation de nitrosamines doit donc être réduite au minimum.

- **Chromate (chrome(VI)):** le chromate a un effet potentiellement cancérigène et est formé lors de l’ozonation à partir du chrome(III). Pour l’eau potable, la valeur limite s’élève à 20 µg/l (DFI, 2015). Selon l’OEaux, l’exigence pour la qualité des eaux de surface se situe à 2 µg/l pour le chrome(III) et le chrome(VI). **La formation de chromate lors de l’ozonation est généralement considérée comme non problématique, car les concentrations de chrome(III) dissoutes dans les eaux usées sont très faibles dans la plupart des cas et la formation de chromate est très lente** (Katsoyiannis et al., 2018). Comme d’autres métaux lourds, le chrome(III) est retenu efficacement dans l’étape de traitement biologique. Il est donc très important que les matières solides soient séparées de manière efficace dans le décanteur secondaire.

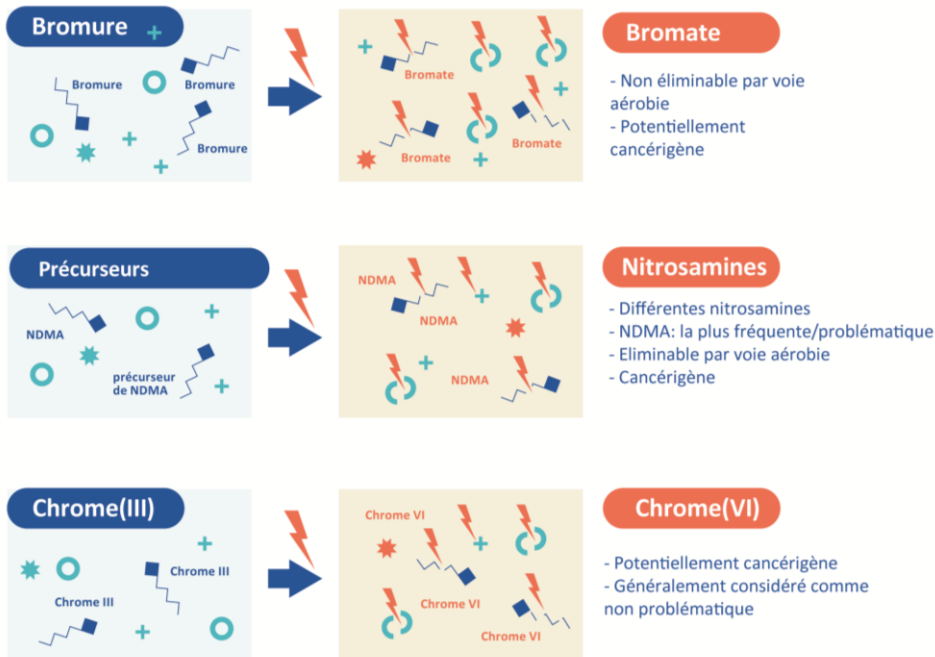
L’interdiction de polluer s’applique aussi au chromate (art. 6 LEaux): la formation de chrome(VI) doit donc être réduite au minimum.

- **Détermination des effets combinés à l’aide de bioessais:** les sous-produits d’oxydation problématiques (ainsi que leurs précurseurs) n’étant pas tous connus, il n’est pas toujours possible de les identifier par le biais d’analyses chimiques. C’est pour cette raison que l’effet combiné de sous-produits d’oxydation inconnus est évalué à l’aide de bioessais (voir chapitre «Bioessais»).

Pour le traitement des eaux usées, il convient de noter que la toxicité après une ozonation et l’étape de traitement complémentaire subséquente doit être au moins au niveau de la décantation secondaire; une augmentation de la toxicité est indésirable.

Analyses chimiques

Sous-produits d'oxydation mesurables individuellement



Analyses éco-toxicologiques

Sous-produits d'oxydation inconnus: identification des effets combinés

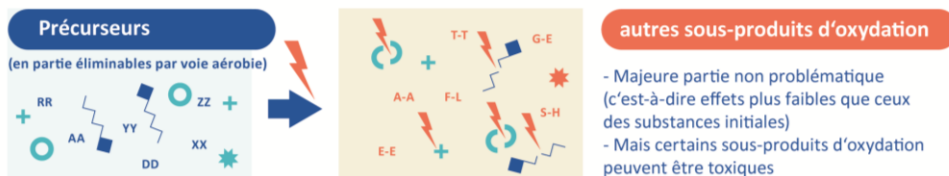


Figure 1. Répartition des sous-produits d'oxydation problématiques en substances connues et analytiquement mesurables (en haut) et en substances inconnues uniquement détectables par le biais des effets (éco)toxicologiques combinés (en bas). NDMA: N-nitrosodiméthylamine, principal représentant des nitrosamines.

4 ACTEURS IMPLIQUÉS: QUI FAIT QUOI ET QUI PAIE?

Dans le cadre du processus d'octroi des indemnités, une «*preuve de l'adéquation du procédé de traitements prévu*» est exigée par l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) (Aide à l'exécution «Financement des mesures», voir Dominguez et al., 2016). Les vérifications recommandées ici concernant l'adéquation du procédé de traitement par ozonation sont indemnisées comme partie des coûts d'investissement jusqu'à 75% (voir le chapitre «Coûts et temps d'exécution»). Il est donc recommandé d'effectuer les analyses au plus tard dans le cadre de l'avant-projet.

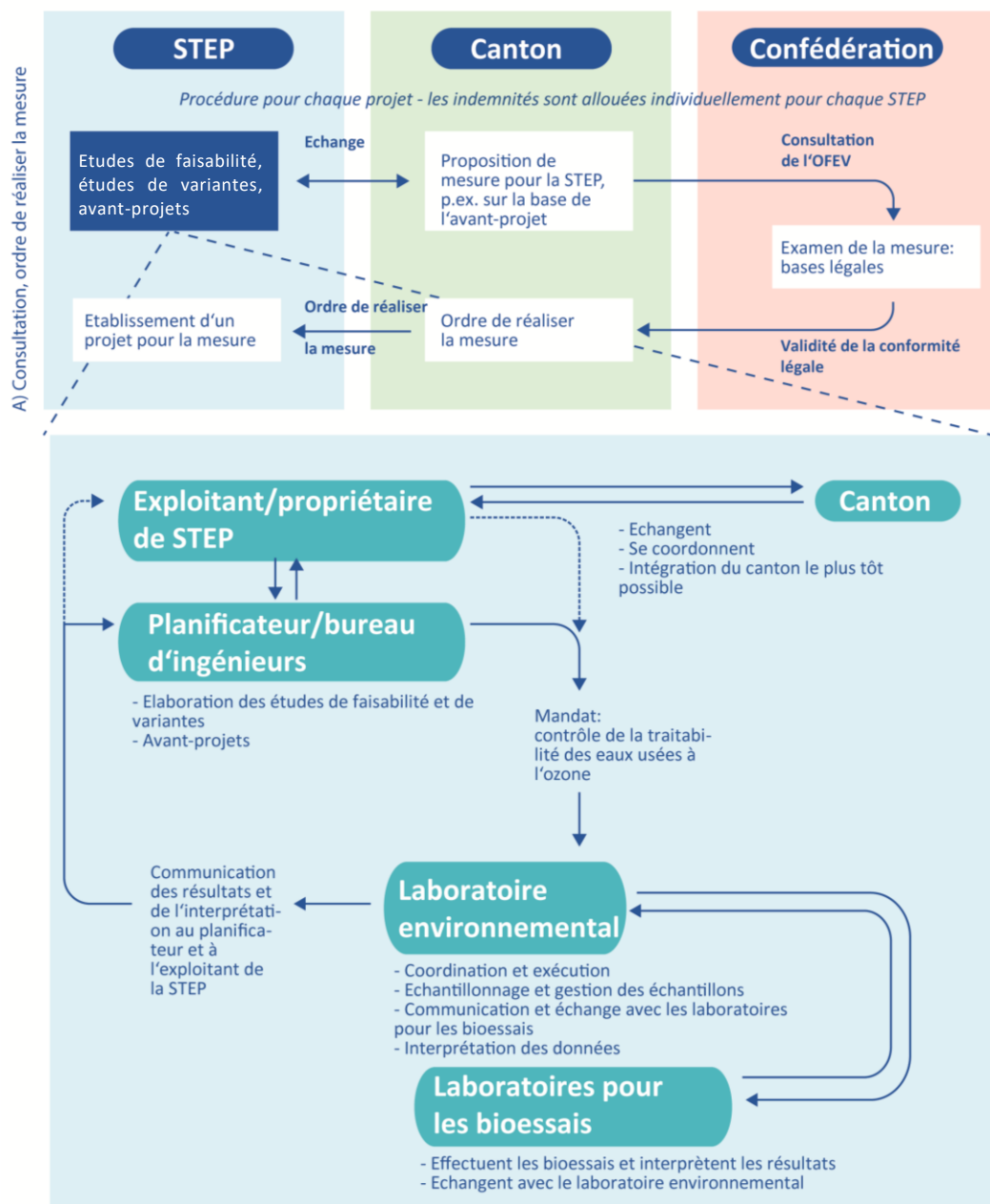


Figure 2. Aperçu des acteurs impliqués et de leurs tâches (source: Aide à l'exécution «Financement des mesures», voir Dominguez et al., 2016, adapté).

La figure 2 représente sous forme schématique les acteurs à impliquer dans les vérifications et à quel moment. **Les études relatives au bassin versant sont menées de préférence par la STEP, en étroite collaboration avec les autorités cantonales responsables et éventuellement avec le planificateur.** Ces acteurs ont généralement déjà de bonnes connaissances du bassin versant. Les autres analyses (étapes 2 à 4 selon fig. 3) devraient être effectuées par un laboratoire environnemental accrédité (ISO 17025) (une liste de potentiels laboratoires peut être fournie par la plateforme VSA «Techniques de traitement des micropolluants»). Le laboratoire coordonne généralement le prélèvement des échantillons, effectue les «Analyses en laboratoire» et transfère les échantillons correspondants aux laboratoires spécialisés pour les différents bioessais. Les résultats (mesures à l'entrée de l'ozonation planifiée, analyses en laboratoire, bioessais; voir chapitre «Marche à suivre et aspects à contrôler») doivent être regroupés par le laboratoire environnemental mandaté et discutés dans un rapport. Le planificateur et l'exploitant décident, en étroite coordination avec les autorités cantonales compétentes, de la marche à suivre.

Dans la mesure où différents acteurs sont impliqués dans ces vérifications, il est important de bien coordonner la démarche. Par ailleurs, les autorités cantonales doivent être intégrées suffisamment tôt, parti-

culièrement pour les décisions importantes. L'exploitant de la STEP et le planificateur échangent étroitement avec le laboratoire environnemental mandaté, qui regroupe les résultats à partir des différents modules et les communique au mandataire.

5 COÛTS ET TEMPS D'EXÉCUTION

Il est important que les analyses soient bien coordonnées entre elles, notamment lors des analyses en laboratoire et des bioessais impliquant différents laboratoires. Pour les vérifications réalisées sur des eaux usées non problématiques, le temps d'exécution nécessaire est estimé à environ 4 à 5 mois. Si des examens supplémentaires ou des mesures (à la source) sont requis, le temps d'exécution est prolongé en conséquence. Les coûts estimés de manière très sommaire se situent dans une plage de plusieurs dizaines de milliers de francs suisses. Mais cela dépend des résultats et des vérifications supplémentaires en cas d'eaux usées indéterminées (Wunderlin et al., 2015). Les bioessais représentent une grande partie des coûts. Les vérifications peuvent donc être interrompues au préalable en cas d'eaux usées inappropriées, pour lesquelles une ozonation n'entre pas en considération. Considérés comme faisant partie des coûts d'investissement, les coûts sont indemnisés à 75%, dans la mesure où ils sont directement nécessaires («autant que nécessaire, aussi peu que possible»). Pour en savoir plus sur la fréquence d'exécution des analyses, veuillez vous reporter au chapitre «Représentativité de l'échantillon et fréquence de l'exécution».

6 MARCHE À SUIVRE ET ASPECTS À CONTRÔLER

6.1 Remarques générales concernant l'interprétation des analyses

Les indemnités ne peuvent être octroyées que si le procédé à mettre en œuvre garantit une protection efficace des eaux (selon l'art. 63 LEaux, voir aussi le chapitre « Conditions cadres légales »). Cela signifie que le procédé doit permettre d'améliorer la qualité de l'eau (Aide à l'exécution «Financement des mesures», voir Dominguez et al., 2016). **Ainsi, lors du traitement d'eaux usées par ozonation, de nouvelles substances problématiques (sous-produits d'oxydation) ne doivent pas être formées de manière excessive.** La formation de substances indésirables pouvant nuire au bon état écologique des eaux doit donc être minimale. Pour les eaux usées convenant à l'ozonation, cette condition préalable est remplie.

Dans le cadre des vérifications exposées dans le présent document, les eaux usées ne convenant pas à une ozonation doivent être préalablement identifiées, car les expositions à l'ozone et aux radicaux OH se situent en dehors de la plage des eaux usées non problématiques (ce qui indique un comportement non conforme des eaux usées), ou des substances problématiques sont formées de manière excessive. Pour certains de ces sous-produits d'oxydation connus et quantifiables (p. ex. bromate), il existe différentes exigences, telles que les valeurs maximales pour l'eau potable, les exigences relatives à la qualité environnementale ou les conditions de déversement des eaux usées industrielles. **Il convient de préciser que les résultats des vérifications sont évalués selon le principe de la garantie d'une protection efficace des cours d'eau (= minimisation de la formation de substances indésirables).** Comme aide à l'interprétation, des valeurs de référence pour les différents modules ont été établies sur la base de l'expérience actuelle. De plus, une analyse générale est effectuée à l'aide de bioessais choisis (identification des effets combinés). La règle est la suivante: une augmentation de la toxicité générée par l'ozonation et le traitement aval n'est pas souhaitable, tandis qu'une réduction de la toxicité constitue une amélioration. A cet effet, une comparaison avec des procédés basés sur le charbon actif peut s'avérer utile: une formation supérieure à la moyenne de sous-produits d'oxydation ou une augmentation de la toxicité des eaux usées fait apparaître l'ozonation comme un procédé beaucoup moins favorable qu'un traitement au charbon actif.

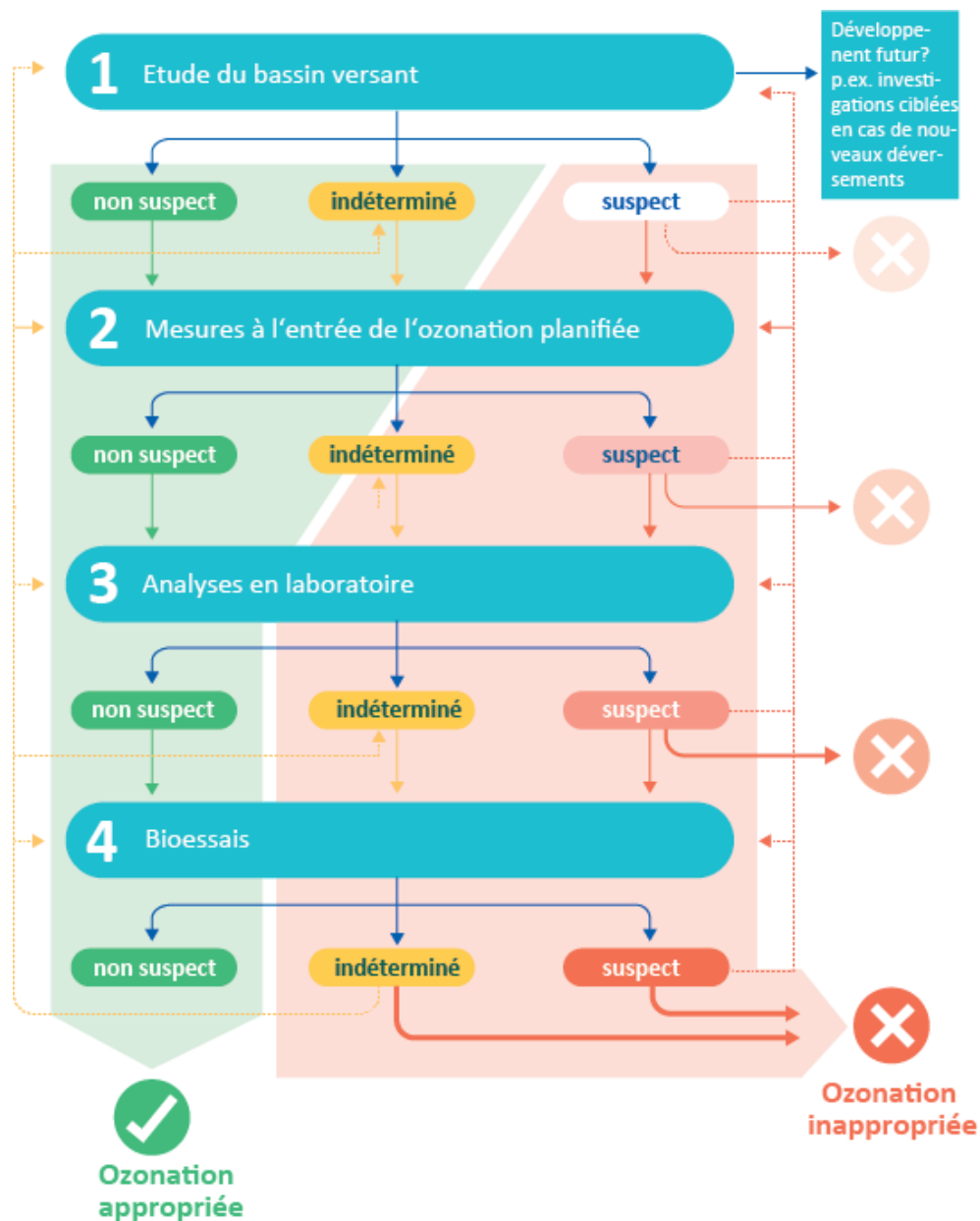


Figure 3. Représentation schématique du déroulement progressif des vérifications. Les traits pointillés (en jaune et rouge) indiquent que certaines vérifications devraient être réitérées en cas de résultats indéterminés/suspects, par exemple après la mise en œuvre de mesures ciblées à la source.

6.2 Bref descriptif des analyses

Le déroulement des vérifications est conçu par étapes. A partir de l'étude qualitative du bassin versant, des analyses de plus en plus spécifiques sont effectuées. Concrètement, les analyses sont réparties en quatre étapes (fig. 3).

- (1) **Etude du bassin versant**: il s'agit ici de procéder à une première classification grossière des eaux usées en considérant les déversements problématiques connus. Les informations déjà existantes doivent être intégrées à l'évaluation.
- (2) **Mesures à l'entrée pour l'ozonation planifiée**: outre les paramètres standard - tels que la DCO (demande chimique en oxygène), le COD (carbone organique dissous), le NO_2^- (nitrite), les colorants - d'autres substances, telles que le bromure, le bromate et les nitrosamines doivent être mesurées. Certaines mesures de chrome sont recommandées, **s'il existe des indices de possibles rejets de chrome dans le bassin versant de la STEP**.
- (3) **Analyses en laboratoire**: dans cette partie, différents tests (exposition à l'ozone et aux radicaux OH, efficacité de l'élimination de composés traces choisis, formation de bromate et de **nitrosamines**) sont

effectués en laboratoire avec des eaux usées traitées biologiquement à la sortie du décanteur secondaire. L'ozonation ainsi que le traitement biologique aval sont simulés. Lors de l'échantillonnage, il convient impérativement de veiller à la représentativité.

- (4) **Bioessais:** en complément aux «analyses en laboratoire», l'effet combiné de potentiels sous-produits d'oxydation inconnus est évalué dans ce module à l'aide de bioessais choisis.

Lors des différentes étapes présentées dans la figure 3, une évaluation de plus en plus fine de la traitabilité des eaux usées à l'ozone peut être effectuée. En cas d'eaux usées clairement suspectes, il n'est pas nécessaire de procéder à toutes les vérifications, car l'ozonation n'est pas une méthode appropriée. Si les eaux usées présentent un résultat indéterminé, il convient de considérer des procédés alternatifs (p. ex. procédés basés sur le charbon actif) ou des mesures contre le déversement de substances transformées par l'ozonation en substances indésirables.

6.3 Module 1: Etude du bassin versant

L'étude du bassin versant doit permettre une première appréciation quant à la présence de charges spécifiques. Il convient en particulier de vérifier si des déversements problématiques de bromure/bromate et précurseurs de nitrosamines sont présents dans le bassin versant de la STEP (fig. 4). **Il s'agit d'une partie importante des vérifications qui devrait être mieux utilisée et pondérée plus fortement dans les projets futurs. Outre les indications sur les rejets potentiellement problématiques, on peut également en déduire des aspects importants pour l'échantillonnage et sa représentativité (voir chapitre 7).**

Les secteurs d'activités suivants sont considérés comme de potentiels producteurs de bromure (voir fig. 4 et annexe pour les données quantitatives; Soltermann et al., 2016a; 2016b):

- Industrie chimique
- Usines d'incinération d'ordures ménagères avec lavage des fumées par voie humide (le bromure provient principalement des agents ignifuges)
- Décharges
- Incinérateurs de déchets spéciaux
- Autres sources mineures (voir annexe). Le sel de déneigement (provenant des Salines suisses du Rhin) ne pose généralement pas de problème, dans la mesure où il contient une très faible quantité de bromure.

1 Etude du bassin versant

Y a-t-il des rejets problématiques de bromure/bromate, nitrosamines (p. ex. NDMA) ou de précurseurs de nitrosamines?

- Industrie chimique
- Usine d'incinération des ordures ménagères avec lavage des fumées par voie humide
- Décharge/incinérateur de déchets spéciaux
- Autres?

Existe-t-il des données déjà disponibles (p. ex. bromure, NDMA)?

- Séries de mesure disponibles?
- Si oui, sur quelle période de temps? Qualité des mesures?

Y a-t-il d'autres aspects à prendre en compte?

- Quels sont les objectifs de développement (économique) dans le bassin versant?
- Des industries spécifiques doivent-elles être implantées?

...

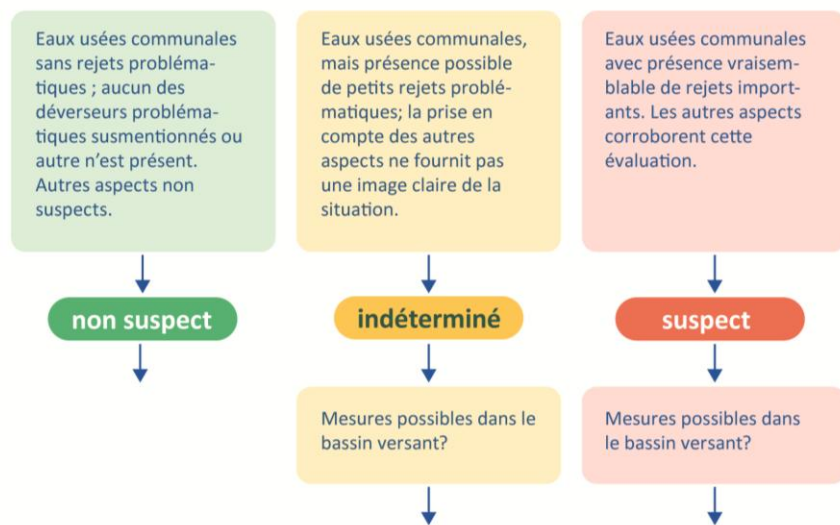


Figure 4. Aspects importants pour l'étude du bassin versant, et première évaluation grossière des eaux usées.

Il existe une multitude de précurseurs de nitrosamines largement inconnus. Il est probable que ces précurseurs sont fréquemment déjà transformés en nitrosamines par les procédés industriels. Les autorités ne savent généralement pas, à l'exception des substances citées dans l'Ordonnance sur la protection des eaux (OEaux), quelles autres substances sont utilisées et à quel moment elles sont déversées dans les STEP. Les nitrosamines déjà présentes à l'entrée de l'ozonation planifiée peuvent indiquer la présence d'industries problématiques. Mais la présence ou non de précurseurs de nitrosamines ne pourra toutefois être déterminée qu'avec les analyses réalisées en laboratoire. **Une liste actualisée des secteurs industriels, des procédés et des substances en rapport avec les précurseurs de bromure et de nitrosamines est disponible sur le site www.micropoll.ch.**

Les paramètres standard peuvent également fournir des informations supplémentaires sur une charge (périodique) spécifique (dynamique élevée, concentration en nutriments inhabituelle, pics de conductivité ou de pH dans l'affluent).

Ces analyses présentent une situation spécifique à un moment précis. C'est pourquoi il faut intégrer dans l'évaluation le plus grand nombre d'aspects déjà connus et pertinents, tels qu'un projet de développement économique prévu dans le bassin versant. Les déversements industriels constituent généralement une plus grande source d'incertitude que les bassins versants purement communaux, en raison de la grande diversité de substances utilisées.

A cette étape, il convient de procéder à une première classification des eaux usées en «normales», «indéterminées» ou «suspectes». Cette répartition est très utile à l'identification de la stratégie d'échantillonnage pour les analyses suivantes (voir également le chapitre «Représentativité de l'échantillon et fréquence de l'exécution des analyses»): en cas d'eaux usées «indéterminées» et «suspectes», il est important de

considérer les déversements problématiques de manière représentative lors de l'échantillonnage et d'impliquer les responsables d'exploitation des STEP dans le processus.

L'étude du bassin versant permet une première évaluation des déversements potentiellement problématiques. Si de tels déversements ont été identifiés, il est utile de réfléchir, dès cette phase, comment et où prendre des mesures à la source ainsi que de s'interroger sur leur efficacité. Il convient de se demander si une ozonation est vraiment appropriée en cas de déversement important ayant un potentiel de réduction limité. Si ce n'est pas le cas, les analyses peuvent être interrompues ici. Il faudra alors recourir à un procédé alternatif (p. ex. procédé basé sur le charbon actif).

6.4 Module 2: Mesures à l'entrée de l'ozonation planifiée

Ce module consiste à effectuer des mesures à l'entrée de l'ozonation planifiée. L'objectif est d'identifier les déversements problématiques en se basant sur l'étude du bassin versant. Il s'agit d'une part des substances problématiques connues, telles que le bromure/bromate et les nitrosamines et le cas échéant le chrome (fig. 5). L'expérience a montré que les concentrations de ces substances présentent une variabilité temporelle dans l'affluent. Il est donc primordial d'effectuer des échantillonnages représentatifs. Il est recommandé d'analyser la composition des eaux usées à l'aide d'échantillons composites hebdomadaires (échantillons composites de 5 jours **en variant le premier jour d'échantillonnage**, proportionnellement au débit) prélevés sur une longue période de temps (3 à 6 mois, **avec 4 échantillons par mois**). **Il est en outre recommandé qu'en plus des échantillons composites hebdomadaires, le bromure soit analysé dans quelques échantillons journaliers. C'est notamment le cas lorsque la concentration de bromure dans un échantillon composite hebdomadaire est $\geq 100 \mu\text{g/L}$. Cela permet de mieux comprendre la dynamique du bromure pour en identifier la source (de fortes fluctuations d'un jour à l'autre indiquent des rejets industriels de bromure). En raison du mélange dans les échantillons composites hebdomadaires, les fortes fluctuations de concentration ne peuvent être détectées de manière adéquate.** Dans la mesure où la formation de chromate est généralement non problématique (**la formation de chromate pendant l'ozonation est très lente et dans la plupart des cas très faible ; Katsoyiannis et al., 2018**), **les mesures du chrome ne devraient être effectuées que s'il y a des indices de rejets de chrome dans le bassin versant ou des concentrations élevées de chrome dans les boues d'épuration.** La classification des eaux usées entreprise à l'étape «Etude du bassin versant» doit être corroborée sur la base ces mesures. Les résultats peuvent être contradictoires, ce qui indique que des déversements importants ne sont pas encore suffisamment connus.

Si des irrégularités ou des anomalies ont été observées dans les paramètres standard (DCO, COD, NO_2^- , colorants, conductivité, valeur pH, etc.) à l'étape «Etude du bassin versant», il est désormais possible d'aborder plus en détail ces aspects et paramètres dans le cadre de campagnes de mesure et d'analyses approfondies. En cas d'anomalies, leur effet sur l'ozonation doit être plus particulièrement contrôlé.

- **Bromure:** dans les études de Soltermann et al. (2016a; 2016b), les concentrations de bromure ont été analysées en entrée des STEP ainsi que dans leurs bassins versants. Il est apparu que les concentrations de bromure étaient inférieures à $100 \mu\text{g/l}$ dans les bassins versants principalement communaux (c'est-à-dire sans déversements problématiques). **L'expérience acquise à ce jour montre que lors de l'ozonation de ces eaux usées non problématiques, la formation de bromate est nettement inférieure à $5 \mu\text{g/L}$ pour une dose d'ozone spécifique de $0.5 \text{ mg O}_3/\text{mg COD}$.** Dans les bassins versants communaux comptant peu de déversements, des concentrations de bromure allant de 100 à $400 \mu\text{g/l}$ ont été mesurées, tandis qu'elles peuvent largement dépasser $400 \mu\text{g/l}$ en cas de déversements importants (se reporter à l'annexe pour obtenir une liste des sources de bromure potentielles). En cas de concentrations de bromure supérieures à $400 \mu\text{g/l}$, il faut s'attendre à une formation fortement accrue de bromates en fonction de la dose d'ozone utilisée et, par conséquent, renoncer à une ozonation. Pour les concentrations de bromure allant de 100 à $400 \mu\text{g/l}$, la formation de bromate doit être étudiée plus précisément en fonction de la dose d'ozone spécifique utilisée.

Notez que la formation de bromate par ozonation doit être réduite au minimum. Le moyen le plus efficace d'y parvenir est d'éliminer les apports de bromure dans le bassin versant par le biais de mesures prises à la source. Eviter une formation élevée de bromates par des mesures d'ordre technique et opérationnel (p. ex. utilisation d'une dose réduite d'ozone en cas de concentrations de bromure élevées en entrée) n'est pas recommandé pour ce type de cas (en raison des variations attendues des concentrations de bromure en entrée ; Soltermann et al., 2017). Il faut plutôt privilégier un procédé alternatif (p. ex. procédé basé sur le charbon actif).

- **Bromate** : La présence de bromate en entrée de l'ozonation planifiée n'a pas d'influence directe sur l'ozonation. Cependant, des concentrations élevées de bromate en entrée peuvent indiquer des activités artisanales et industrielles dans le bassin versant de la STEP. C'est pourquoi, lors de futures vérifications, il faudra également analyser le bromate en entrée de l'ozonation planifiée pendant au moins un mois, en parallèle des mesures de bromure. Indépendamment de l'adéquation du processus d'ozonation, si les concentrations de bromate en entrée sont élevées, il est recommandé d'identifier la source dans le bassin versant et d'examiner les mesures visant à réduire le bromate à la source.

2 Mesures à l'entrée de l'ozonation (sortie du décanteur secondaire)

Quelles sont les concentrations des substances suivantes à l'entrée de l'étape d'ozonation (sortie du décanteur secondaire):

- Bromure / bromate
- Nitrosamines, corrélation avec des précurseurs
- Chrome / chromate (facultatif, en cas d'indications)

Y a-t-il des anomalies au niveau des paramètres standard?

- DCO, COD, couleur, nitrite, valeur pH, conductivité, etc.

Procédure à appliquer pour la campagne de mesure:

- Echantillons composites hebdomadaires pendant 3-6 mois, car les concentrations à l'entrée peuvent fortement varier, quelques échantillons journaliers
- Idéalement combinés avec les analyses issues du module 3 «Analyses en laboratoire»: étudier la formation de bromate, NDMA
- Conforme aux conclusions tirées du module 1 «Etude du bassin versant»?

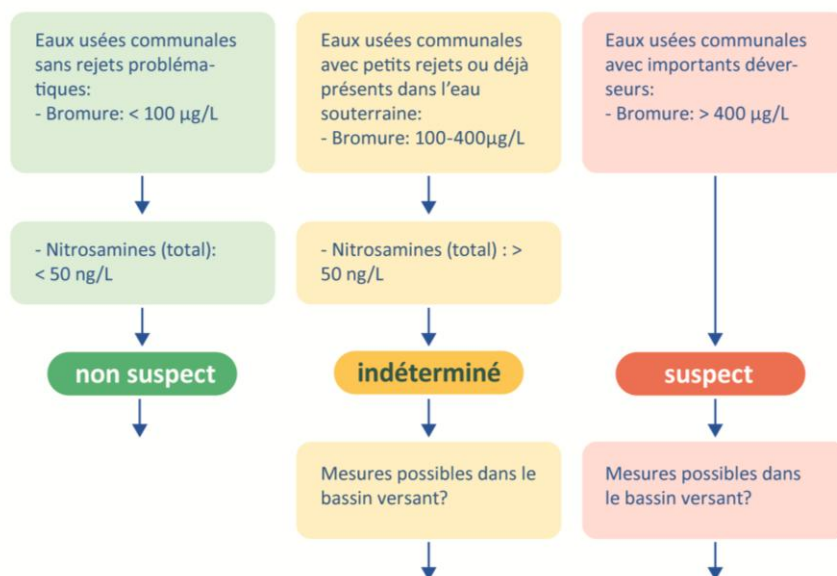


Figure 5. Procédure d'évaluation de la composition des eaux usées et critères de répartition des eaux usées analysées. DCO, COD: carbone organique dissous, NDMA: N-nitrosodiméthylamine, NMOR: N-nitrosomorpholine.

- **Nitrosamines**: la formation de nitrosamines pendant l'ozonation n'est pas encore suffisamment comprise. Par ailleurs, la plupart des précurseurs demeurent encore mal connus. Les résultats obtenus à ce jour montrent que dans les eaux usées jugées appropriées, les concentrations de NDMA et de NMOR sont bien inférieures à 50 ng/l. Il a également été démontré que les concentrations de référence pour la NDMA (< 5 ng/l, > 5 ng/l, >> 5 ng/l ; sur la base des études de Krauss et al., 2009) définies dans la recommandation du VSA (version 1 du 28 mars 2017) ne peuvent pas être vérifiées avec les méthodes d'analyse disponibles dans le commerce (limite de détermination en fonction de l'eau usée et de la nitrosamine à 5 ng/l ou plus). Ces critères d'évaluation n'ont donc pas pu être pris en compte dans les vérifications précédentes.

C'est pourquoi une nouvelle possibilité d'évaluation a été développée. Sur la base de la valeur 90% des données existantes (vérifications effectuées dans 40 STEP; données de Krauss et al. (2009)), une plage de référence pour les eaux usées non problématiques a été définie : une concentration totale de nitrosamines (somme des 9 nitrosamines en équivalents NDMA) < 50 ng/l en entrée de l'ozonation

planifiée peut être classée comme non-suspecte. Les concentrations > 50 ng/l doivent être classées comme indéterminées.

Les précurseurs de nitrosamines peuvent également provenir de sources internes aux STEP: ainsi, Sgroi et al. (2014) ont indiqué que des polymères de polyacrylamide basés sur la DMA sont parfois utilisés pour l'assèchement et l'épaississement de boues et peuvent constituer une source importante de NDMA (apports via les boues recirculées). Il est donc important de tester les eaux usées à l'entrée réelle de l'ozonation planifiée, en tenant compte de toutes les recirculations internes aux STEP.

La formation de nitrosamines par ozonation doit être réduite au minimum. Des concentrations élevées de nitrosamines à l'entrée de l'ozonation planifiée indiquent la présence de rejets problématiques, toutefois il n'y a pas de lien direct entre les concentrations de nitrosamines à l'entrée de l'ozonation et le potentiel de formation de nitrosamines lors de l'ozonation. Dans les deux cas, des mesures ciblées à la source devraient être étudiées. Les nitrosamines restent importantes pour détecter les anomalies dans la composition des eaux usées et sont maintenues dans l'évaluation, notamment en raison de leur pertinence (cancérogènes) (Wunderlin et al., 2026).

- **Chrome:** la formation de chromate (chrome(IV)) est considérée comme non problématique à l'échelle de la Suisse, car les concentrations de chrome(III) à l'entrée des STEP sont très faibles dans la plupart des cas. Les concentrations de chrome(tot) dans les entrées des STEP suisses montrent que, dans la plupart des cas, elles sont largement inférieures à 1 µg/l: dans 70 STEP suisses échantillonnées, la concentration de chrome(tot) était inférieure à 1 µg/l, tandis qu'elle était de 10 µg/l dans une seule STEP (Katsoyiannis et al., 2018). Des concentrations de chrome(tot) élevées sont donc inhabituelles et indiquent la présence d'activités industrielles ou d'autres charges de chrome spécifiques dans le bassin versant de la STEP. Dans ces cas-là, il convient de rechercher la source de chrome. De faibles concentrations de chrome ne représentent aucun danger de formation indésirable de chromate, car celle-ci ne se produit que très lentement lors de l'ozonation (Katsoyiannis et al., 2018). Par ailleurs, les mesures existantes de chrome dans les boues d'épuration doivent être considérées: le chrome(III), comme d'autres métaux lourds, est en grande partie transféré dans les boues activées. Des variations élevées des concentrations de chrome dans les boues d'épuration ou des valeurs anormalement élevées peuvent donc indiquer des concentrations de chrome (périodiquement) élevées en entrée et donc fournir des informations importantes sur la présence de charges de chrome spécifiques ou des activités industrielles dans le bassin versant de la STEP. Etant donné que la formation de chromate lors de l'ozonation, comme mentionné ci-dessus, ne pose généralement pas de problème, les mesures du chrome ne doivent être effectuées que s'il existe des indications de rejets de chrome dans le bassin versant ou de concentrations élevées de chrome dans les boues d'épuration.

Notez que la formation de chromate par ozonation doit être réduite au minimum. Des concentrations de chrome élevées dans l'affluent révèlent la présence de rejets problématiques.

- **Paramètres standard:** les exigences relatives aux paramètres standard sont définies dans l'Ordonnance de protection des eaux (OEaux). En conséquence, le rejet des eaux usées industrielles ne doit ni perturber ni entraver le fonctionnement de la station d'épuration. Dans la pratique, cependant, de tels événements se produisent régulièrement. Il peut, par exemple, arriver que des charges organiques excessives régulières apparaissent à l'entrée de l'ozonation planifiée: pour un STEP communale et un âge des boues entre 1 et 20 jours, les concentrations de COD en sortie (concentrations en entrée de l'ozonation planifiée) sont comprises entre 5 et 10 mg COD/l, des concentrations plus élevées peuvent indiquer une charge industrielle. Des pics de nitrite périodiques en sortie (>1 mg NO₂⁻-N/l) peuvent également révéler la présence de substances problématiques. Par ailleurs, le nitrite réagit très rapidement avec l'ozone (3.4 g d'ozone sont requis pour l'oxydation de 1 g NO₂⁻-N). Une quantité d'ozone plus importante est alors consommée pour respecter le taux d'élimination exigé par la loi. Ce point doit être pris en compte lors du dimensionnement et de l'exploitation de l'ozonation. Des études récentes de l'Eawag montrent que des concentrations en nitrite dans les eaux usées traitées à partir d'environ 0,3 mg NO₂⁻-N/L peuvent accroître la formation de mutagénicité lors de l'ozonation (Manasfi et al., soumis). Les nitrites en entrée d'ozonation devraient donc rester en dessous de cette concentration. Si des pics récurrents de concentrations en nitrites sont observés dans les données d'exploitation, des investigations supplémentaires concernant la mutagénicité sont recommandées. De plus, l'exploitation de la STEP devrait être optimisée afin de réduire les concentrations en nitrites.
- Des colorations périodiques des eaux usées révèlent l'existence d'activités industrielles dans le bassin versant. De plus, l'évolution du pH et de la conductivité peuvent révéler la présence d'anomalies. Ces informations concernant les effets sur l'exploitation de la STEP peuvent être utiles pour des vérifications plus poussées. Toutefois, jusque-là, ces informations provenant de l'exploitation de la STEP

n'ont été intégrées que de façon limitée dans les vérifications. Il est donc recommandé de tenir davantage compte de ces aspects dans les projets futurs.

6.5 Module 3 : Analyses en laboratoire

Lors de ce module, des analyses spécifiques sont effectuées en laboratoire avec des échantillons d'eau usée. Ces analyses sont également connues sous le nom de «Méthode d'essai pour l'évaluation de la traîtabilité des eaux usées à l'ozone» (voir également Wunderlin et al., 2015, Schindler Wildhaber et al., 2015). Pour ce faire, un échantillon composite de 5 jours est prélevé dans la STEP à l'entrée de l'ozonation planifiée (c'est-à-dire à la sortie du décanteur secondaire) - de la même manière que pour les « mesures à l'entrée de l'ozonation planifiée» (module 2) - et analysé en laboratoire. Les analyses sont réalisées pour doses d'ozone spécifiques de 0.5, 1 et 1.5 mg O₃/mg COD, afin de simuler des conditions d'exploitation habituelles et extrêmes. Dans le cadre de l'exploitation d'une ozonation à l'échelle industrielle, les doses d'ozone ont tendance à être plus faibles qu'on ne le pensait auparavant. Cela signifie que les doses d'ozone spécifiques testées en laboratoire doivent être ajustées. Par conséquent, les vérifications doivent également être réalisées avec une dose d'ozone spécifique de 0.2 mg O₃/mg COD.

Si une STEP ne développe sa phase de traitement biologique vers une nitrification qu'à une date ultérieure, la composition des eaux usées change. La composition actuelle des eaux usées n'est donc pas représentative de la situation future. Dans de tels cas, ainsi que 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, il est recommandé de nitrifier les eaux usées en laboratoire avant les modules 3 et 4 (Wunderlin et al., 2026). La méthodologie est décrite dans la SOP (Envilab, 2021, complétée en 2026).

Des directives de travail détaillées pour réaliser ces analyses sont disponibles dans un document séparé sous www.micropoll.ch (voir «Instructions relatives à la réalisation des essais en laboratoire»). Une liste des laboratoires agréés peut vous être fournie par la plateforme VSA «Techniques de traitement des micropolluants».

Les différentes analyses sont brièvement abordées ci-après (voir également fig. 7). Pour obtenir une description détaillée des analyses ainsi que des données relatives aux plages de référence, voir [les instructions pour la réalisation des tests de laboratoire \(Envilab, 2021, complétée en 2026\)](#).

Les nitrites doivent être pris en compte dans l'évaluation en cas de concentrations élevées (récurrentes) en sortie (> 0,3 mg NO₂⁻-N/L) (conformément aux analyses du module 2). Dans de tels cas, un échantillon d'eaux usées présentant des concentrations autant élevées doit être utilisé pour les modules 3 et 4. Alternativement, l'échantillon d'eaux usées peut également être enrichi en nitrites.

(A) Effets de la matrice sur la stabilité de l'ozone

Dans ces analyses, l'exposition d'ozone est déterminée à des doses d'ozone spécifiques de 0.5, 1.0 et 1.5 mg O₃/mg COD. Une comparaison avec des eaux usées de référence non problématiques permet d'évaluer s'il y a des différences entre les eaux usées étudiées (rejet de la décantation secondaire) et les eaux usées de référence non problématiques. Sur la base des données actuelles, il a pu être démontré que les valeurs d'exposition supérieures à la plage de référence (en particulier à des doses d'ozone spécifiques de 1.0 et 1.5 mg O₃/mg COD) peuvent être des artefacts dus à la compensation des nitrites. Cette compensation peut entraîner un surdosage d'ozone. Une faible exposition, en revanche, est généralement due à une composition des eaux usées influencée par l'industrie. L'interprétation des valeurs d'exposition à l'ozone est donc adaptée en fonction de ces nouvelles connaissances : Les eaux usées qui se trouvent dans la plage de référence (fig. 6 à gauche) sont toujours classées comme étant non-suspectes ; les eaux usées qui se trouvent en dessous sont suspectes. Les eaux usées pour lesquelles l'exposition à l'ozone et aux radicaux OH sont supérieures à la plage de référence respective doivent être classées comme indéterminées.

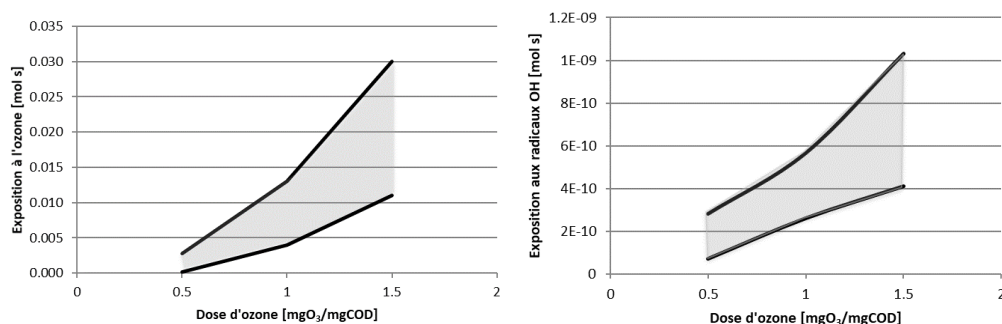


Figure 6. Plages de référence basées sur l'analyse des eaux usées communales (d'après Lee et al., (2013), complétées par les données actuelles) pour l'exposition à l'ozone (à gauche) et aux radicaux OH (à droite). La plage de référence pour l'exposition aux radicaux OH a été élargie sur la base des données existantes pour les eaux usées adéquates (voir Grelot et al., (2020)).

(B) Effets de la matrice sur la stabilité des radicaux OH

Au cours de ces examens, l'exposition aux radicaux OH est déterminée à des doses d'ozone spécifiques de 0.2, 0.5, 1.0 et 1.5 mg O₃/mg COD, de manière analogue et simultanée à l'exposition d'ozone. Une comparaison avec des eaux usées de référence non problématiques permet d'évaluer s'il y a des différences entre les eaux usées étudiées (rejet de la décantation secondaire) et les eaux usées de référence non problématiques. Comme pour l'exposition à l'ozone, la compensation des nitrites peut également conduire à des artefacts lors de l'étude de l'exposition aux radicaux OH à des doses élevées. Pour certaines eaux usées appropriées, l'exposition aux radicaux OH est plus élevée que prévu aux doses d'ozone étudiées. Par conséquent, la plage de référence pour les eaux usées non problématiques est légèrement étendue vers le haut. L'évaluation des valeurs d'exposition aux radicaux OH au-dessus et au-dessous ou dans la plage de référence est équivalente à celle des valeurs d'exposition à l'ozone.

(C) Efficacité de l'élimination des composés traces (par ex. atrazine, phénytoïne)

L'efficacité de l'élimination des deux composés traces atrazine et phénytoïne (ou de toute autre substance présentant une oxydabilité similaire) est déterminée avec une dose d'ozone spécifique de 0.2 et 0.5 mg O₃/mg COD. Les deux substances ne réagissent que très lentement avec l'ozone. Elles sont donc principalement éliminées par l'effet des radicaux OH. L'efficacité de l'élimination est donc directement liée à l'exposition aux radicaux OH (voir ci-dessus). Elle peut être déterminée à l'aide des données d'exposition aux radicaux OH obtenues et des constantes de réaction, puis être comparée avec la performance d'élimination mesurée ici. Cette étape sert également au contrôle des aspects (A) et (B). En cas d'eaux usées non problématiques comportant des expositions aux radicaux OH situées dans la plage des données de référence, les deux substances analysées sont éliminées de manière efficace, en fonction de la dose d'ozone spécifique. Si les deux substances ne sont pas éliminées ou sont moyennement éliminées, cela indique que les eaux usées sont probablement problématiques (exposition aux radicaux OH peu élevée).

Dans la plupart des vérifications effectuées jusque-là, seul le taux de dégradation de l'atrazine a été déterminé. Ces chiffres sont les plus bas pour les eaux usées classées comme inadéquates. Une classification claire basée sur les taux de dégradation est cependant difficile. L'étude de l'efficacité de l'élimination des composés traces sert à vérifier l'exposition aux radicaux OH et s'est avérée efficace à cet égard.

(D) Sous-produits d'oxydation: formation de bromate

La formation de bromate est déterminée avec des doses d'ozone spécifiques de 0.2, 0.5 et 1.0 mg O₃/mg COD. La détermination des concentrations de bromure à l'entrée (voir le module 2 «Mesures à l'entrée de l'ozonation planifiée») permet déjà de fournir une première évaluation de l'éventuelle formation de bromate. Pour la réalisation d'une ozonation à l'échelle industrielle, la formation de bromate doit être réduite au minimum (art. 6 LEaux). Les résultats obtenus à ce jour montrent qu'avec une dose de 0.5 mg O₃/mg COD, une formation de bromate inférieure à 5 µg/l peut être classée comme non-suspecte. En cas de formation de bromate supplémentaire, il est recommandé de procéder à des vérifications supplémentaires. Selon l'état actuel des connaissances, la formation de bromate devrait être négligeable à une dose d'ozone de 0.2 mg O₃/mg COD.

Les investigations sur la représentativité de l'adéquation du procédé d'ozonation (Piazzoli et al., 2022) montrent que la formation de bromate est généralement plus élevée lors des essais en laboratoire que dans les installations d'ozonation à grande échelle. Cela pourrait s'expliquer par le fait que les essais en laboratoire présentaient une concentration initiale en ozone plus élevée par rapport à l'installation à grande échelle, entraînant une exposition plus importante aux radicaux O₃/OH (Wunderlin et al., 2026).

3 Analyses en laboratoire

(A) Effets de la matrice sur la stabilité O₃

- L'exposition de l'ozone se situe-t-elle dans la plage de référence? Si ce n'est pas le cas, quel est l'écart? Est-elle supérieure ou inférieure?

(B) Effets de la matrice sur la stabilité des radicaux OH

- L'exposition des radicaux OH se situe-t-elle dans la plage de référence? Si ce n'est pas le cas, quel est l'écart? Est-elle supérieure ou inférieure?

(C) Efficacité de l'élimination des composés traces (p. ex. atrazine, phénytoïne)

- Ces substances sont principalement éliminées par les radicaux OH
- Dans quelle mesure les deux substances sont-elles éliminées?

(D) Sous-produits d'oxydation: formation de bromate

- Principe: la formation de bromate doit être réduite au minimum (art. 6 LEaux)
- À combien s'élève la formation de bromate?

(E) Sous-produits d'oxydation: formation de NDMA

Principe: la formation de NDMA doit être réduite au minimum (art. 6 LEaux)
- À combien s'élève la formation de NDMA?
- L'élimination par le traitement biologique aval est-elle efficace?

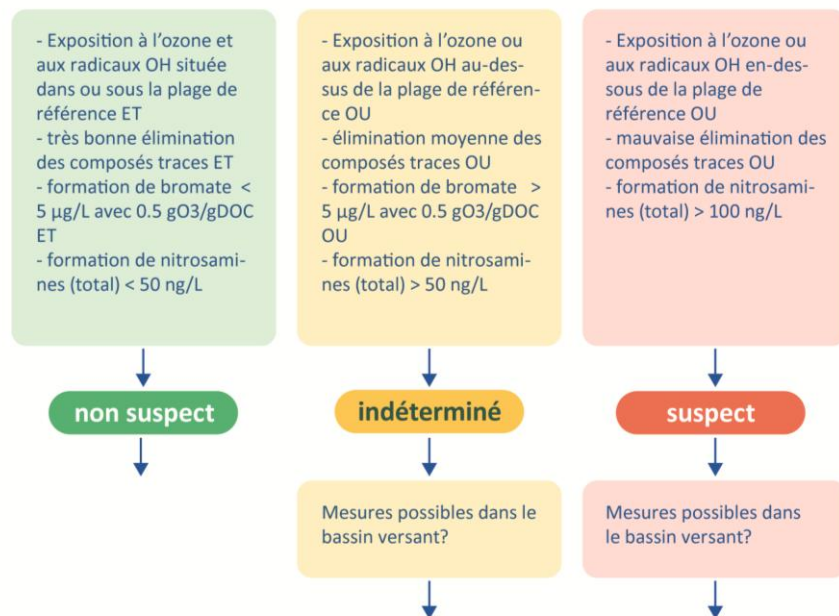


Figure 7. Aspects à étudier dans le cadre des analyses réalisées en laboratoire et critères à prendre en compte pour l'évaluation des eaux usées étudiées.

(E) Sous-produits d'oxydation: formation de nitrosamines

Comme pour la formation de bromate, la formation de nitrosamines par ozonation est déterminée avec des doses d'ozone spécifiques de 0,2, 0,5 et 1,0 mg O₃/mg COD. La formation des nitrosamines est fortement dépendante des précurseurs. Ceux-ci sont divers, en grande partie inconnus mais pas présents dans toutes les eaux usées. Le potentiel de formation de nitrosamines, déterminé lors de ces vérifications, peut varier d'une eau usée à une autre. Par conséquent, ces vérifications doivent être effectuées sur une période plus longue, en particulier pour les eaux usées dont la composition varie considérablement. Dans la mesure où les nitrosamines peuvent être de nouveau partiellement éliminées en conditions aérobies, la concentration de nitrosamines doit être déterminée à la fois après l'ozonation et après le traitement biologique complémentaire. Pour la réalisation d'une ozonation à l'échelle industrielle, la formation de nitrosamines doit être réduite au minimum (art. 6 LEaux). Sur la base des données actuellement disponibles, la formation de nitrosamines peut être évaluée comme suit : les concentrations de nitrosamines totales formées < 50 ng/l sont non-suspectes, les concentrations > 50 ng/l ou > 100 ng/l doivent être classées comme indéterminées ou suspectes. Une autre indication des rejets industriels est la formation de nitrosamines, telles que la NMEA ou la NDIPA. Ces nitrosamines, que l'on trouve assez rarement dans les eaux usées communales, sont le signe d'une composition particulière des eaux usées. Si des nitrosamines sont formées par

ozonation, il est important qu'elles soient de nouveau éliminées de manière significative lors du traitement biologique complémentaire. **Par conséquent, la dégradation des nitrosamines formées doit être étudiée par un traitement complémentaire simulé en laboratoire.**

6.6 Module 4: Bioessais

Dans ce module, des analyses sont effectuées à l'aide de tests écotoxicologiques, afin d'identifier d'éventuels effets négatifs de sous-produits d'oxydation inconnus (fig. 1 et 7). Il ne s'agit pas d'évaluer les effets de l'élimination des micropolluants dans les eaux usées traitées. Ceux-ci sont connus et ont déjà été documentés dans d'autres études (p. ex. Kienle et al., 2015). Il s'agit plutôt de vérifier, à l'aide de tests (éco)toxicologiques appropriés, si une ozonation forme des sous-produits d'oxydation indésirables, augmentant ainsi la toxicité des eaux usées traitées. Pour ce faire, les échantillons d'eau usée provenant des «analyses en laboratoire» (rejet de la décantation secondaire, traitement par ozonation, traitement par ozonation avec traitement biologique aval) sont utilisés. **L'expérience a montré que la dose spécifique d'ozone appliquée dans les ozonations à l'échelle industrielle est inférieure à celle supposée au moment de la publication de la version 1 de cette recommandation du VSA (28 mars 2017). Il est donc recommandé d'effectuer les biotests après un traitement à 0.5 mg O₃/mg COD lors des futures vérifications. En outre, il a été constaté que les échantillons d'eaux usées traitées à l'ozone (avant le traitement biologique complémentaire) n'ont généralement pas fait l'objet de biotests jusqu'à présent, contrairement à ce qui est recommandé ici. Des informations précieuses ont ainsi été perdues.**

Les trois tests suivants sont recommandés au minimum pour ces analyses (voir tabl. 1 surligné en gris, et fig. 6): (i) test de fluctuation d'Ames (avec les lignes de cellule TA98 ~~et TA100~~ avec et sans activation S9 – **La souche TA100 n'est plus recommandée, car elle n'est pas assez sensible**) – **Il est recommandé de mesurer également avec les souches YG1041, YG1042 et YG7108 afin d'élargir la base de données. Toutefois, elles ne constituent actuellement pas un critère décisionnel (Wunderlin et al., 2026)**, (ii) test de reproduction avec des puces d'eau (*Ceriodaphnia dubia*) et (iii) test combiné des algues (avec algues vertes). Ces tests représentent différents niveaux trophiques et endpoints toxicologiques, tels que la mutagénicité, la croissance de la population et l'inhibition de la photosynthèse. Les tests utilisés ne doivent pas se limiter à cette sélection, d'autres tests appropriés peuvent également être effectués. D'autres options sont envisageables, telles que le test UmuC, le test des bactéries luminescentes et le **test de toxicité sur les embryons de poissons**. La sélection n'est pas et ne doit pas être exhaustive. Les détails concernant la réalisation des tests sont à discuter avec le laboratoire en charge des bioessais.

Tableau 1. Aperçu des bioessais, des organismes tests utilisés ainsi que des effets détectables (selon Kienle et Langer, 2016).

Bioessai	Organisme test	Effets détectables
<i>Test de fluctuation d'Ames</i>	Bactéries (salmonelles)	Modification héréditaire du matériel génétique (mutagénicité)
<i>Test de reproduction chronique avec des puces d'eau</i>	Puces d'eau	Inhibition de la reproduction, taux de survie plus faible
<i>Test combiné des algues</i>	Algues vertes	Inhibition de la photosynthèse (notamment sous l'effet de certains herbicides) et inhibition de la croissance
<i>Test de toxicité sur les embryons de poissons</i>	Poisson zèbre	Perturbation du développement normal, réduction de la survie
<i>Test UmuC</i>	Bactéries (salmonelles)	Détérioration du génome (génotoxicité)
<i>Test des bactéries luminescentes</i>	Bactéries luminescentes	Inhibition de la bioluminescence

Lors de l'évaluation des résultats des bioessais effectués, il convient de vérifier comment le traitement à l'ozone et le post-traitement biologique ont modifié la toxicité. **Seule une diminution de la toxicité par le traitement à l'ozone et le post-traitement est souhaitable et représente une amélioration. Une augmentation de la toxicité est indésirable et indique la présence d'une anomalie. Il convient alors de renoncer à une ozonation.** Pour compléter ces considérations relatives, la toxicité déterminée peut être comparée

avec des eaux usées de référence non problématiques. Une plage de référence pour les eaux usées non problématiques est actuellement en cours d'élaboration sur la base des données existantes. Lors de l'interprétation des résultats obtenus à partir des analyses (éco)toxicologiques, il est important de faire appel à l'expérience du laboratoire en charge des bioessais.

4 Bioessais

Bioessais recommandés:

- Test de fluctuation d'Ames (TA98 et TA100, avec/sans activation S9)
- Test de reproduction avec des daphnies (*Ceriodaphnia dubia*)
- Test combiné avec des algues vertes

Bioessais optionnels

- Test UmuC
- Test des bactéries luminescentes
- Test de toxicité sur les embryons de poissons

...

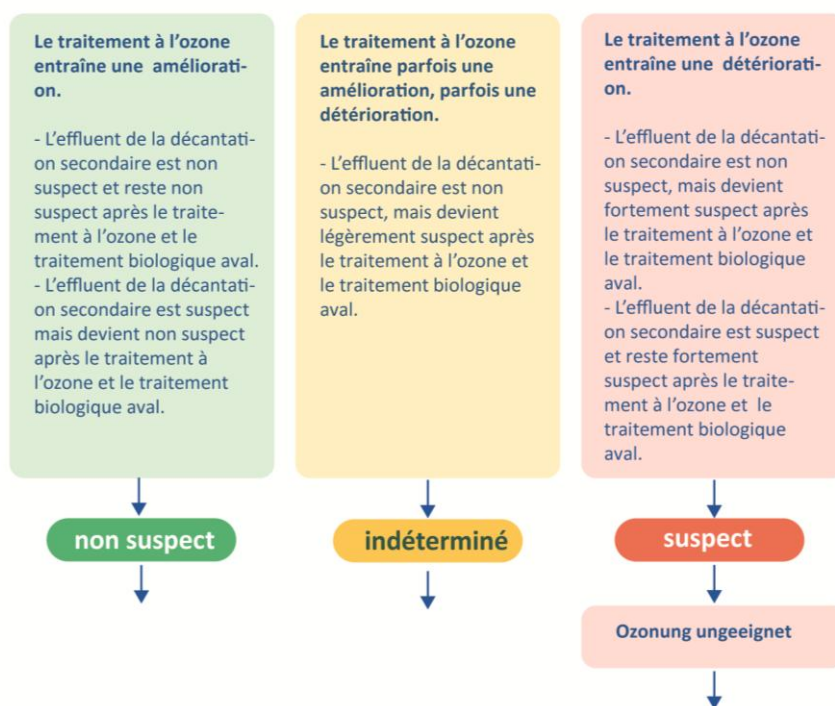


Figure 8. Bioessais recommandés et optionnels (pour des informations plus détaillées sur ces bioessais, voir également le tableau 1). Pour l'interprétation des résultats, il s'agit en premier lieu d'étudier dans quelle mesure le traitement influe sur la toxicité. Non suspect: la toxicité est nettement diminuée ou reste peu élevée; légèrement suspect: la toxicité augmente légèrement sous l'effet du traitement; fortement suspect; la toxicité augmente fortement sous l'effet du traitement.

7 REPRÉSENTATIVITÉ DE L'ÉCHANTILLON ET FRÉQUENCE DE L'EXÉCUTION

La fréquence de l'exécution des analyses est déterminée par la variabilité du bassin versant. Les «mesures à l'entrée de l'ozonation planifiée» (module 2) sont recommandées sur une période de 3 à 6 mois (échantillons composites de 5 jours **en variant le premier jour d'échantillonnage, avec 4 échantillons par mois**), car par exemple les concentrations de bromure peuvent être très variables. **En outre, en plus des échantillons composites hebdomadaires, le bromure sera également testé dans quelques échantillons composites journaliers. En raison de la dilution, les fortes variations de concentration ne peuvent être détectées de manière adéquate dans les échantillons composites hebdomadaires.** Pour les «analyses en laboratoire», une ou deux analyses (c'est-à-dire un à deux échantillons composites de 5 jours différents) peuvent se

révéler suffisantes en cas d'eaux usées communales normales, si l'échantillon était représentatif. **Étant donné que les modules 3 ("Analyses en laboratoire") et 4 ("Biotests") sont effectués avec un échantillon composite de 5 jours, il est d'autant plus important qu'ils soient réalisés avec un échantillon d'eaux usées représentatif. Sur la base des résultats du module 2, les concentrations moyennes de bromure, de nitrosamines et de nitrite des eaux usées concernées sont connues. L'échantillon destiné aux modules 3 et 4 doit avoir des concentrations comparables de bromure, de nitrosamines et de nitrite. Les analyses peuvent et devraient également être réalisées plusieurs fois, si nécessaire. Cela vaut plus particulièrement pour des eaux usées indéterminées et suspectes, où la composition des eaux usées peut varier très fortement. Il convient de veiller à identifier les déversements problématiques (périodiques) de manière représentative grâce à l'échantillonnage et intégrer les (différents) états de fonctionnement de la STEP au processus. À cette fin, il est recommandé d'étaler l'échantillonnage sur une plus longue période (différents jours de la semaine et différentes saisons).** De même, les recirculations internes aux STEP doivent être prises en compte lors de l'échantillonnage. La représentativité des échantillons analysés doit être garantie dans le cas d'un regroupement de deux STEP. A cet effet, un mélange d'eaux usées proportionnel au débit doit être analysé. Mais si après le regroupement, les eaux usées sont prétraitées avec un procédé biologique différent (p. ex. introduction d'une nitrification), il convient de veiller à ce que le futur procédé biologique ou **l'assainissement complet d'une station d'épuration avec modification du traitement biologique (p.ex. nitrification)** puisse déjà être inclus dans les analyses préalables. Dans tous les cas, il est important d'entamer suffisamment tôt le dialogue avec les autorités compétentes.

En principe, il convient de renoncer à une ozonation s'il est difficile de prélever des échantillons représentatifs des eaux usées et qu'ainsi seule une évaluation très limitée peut être réalisée.

8 ÉVALUATION FINALE

Les eaux usées étudiées doivent désormais être évaluées à l'aide des vérifications effectuées. Pour ce faire, les eaux usées étudiées sont réparties dans les catégories suivantes:

- **Une ozonation des eaux usées s'est révélée comme CLAIREMENT NON PROBLÉMATIQUE lors de toutes les analyses:** une ozonation convient à ces eaux usées, si l'échantillon était représentatif (il est recommandé de ne pas s'appuyer sur une seule campagne de mesures). Des analyses complémentaires sont recommandées (voir le chapitre «Analyses complémentaires»).
- **Une ozonation des eaux usées s'est révélée comme CLAIREMENT PROBLÉMATIQUE lors des analyses:** une ozonation ne convient pas à ces eaux usées. Si aucune mesure ciblée n'est possible à la source ou que les déversements problématiques ne peuvent pas être aisément identifiés, il convient d'opter pour un procédé alternatif (p. ex. procédé basé sur le charbon actif). Il convient également de noter que, dans un bassin versant industriellement marqué, les évolutions futures demeurent indéterminées. Même si, par exemple, des mesures prises à la source peuvent considérablement améliorer la situation dans le bassin versant actuel, il n'y a aucune garantie que cela perdure à l'avenir.
- **Les vérifications n'ayant pas donné de résultats clairs, l'ozonation des eaux usées ne peut PAS ÊTRE CLAIREMENT CLASSÉE COMME APPROPRIÉE/INAPPROPRIÉE:** à l'aide de ces analyses, il n'est pas possible d'évaluer si les eaux usées étudiées conviennent à une ozonation, car des anomalies ponctuelles sont apparues. Cela révèle la présence de déversements problématiques dans le bassin versant de la STEP. Si les déversements problématiques peuvent être identifiés du fait de la nature des particularités observées (p. ex. concentrations de bromure périodiquement élevées), des mesures correspondantes doivent être prises à la source. Mais si les mesures nécessaires ne sont pas réalistes et disproportionnées, les eaux usées ne conviennent pas à une ozonation. Un procédé alternatif (p.ex. basé sur le charbon actif) doit être réalisé. Lors de mesures prises à la source dans le cas de précurseurs connus et quantifiables (p. ex. bromure), l'amélioration obtenue grâce à ces mesures peut être déterminée à l'aide d'estimations mathématiques (p. ex. concentrations de bromure effectives à l'entrée de l'ozonation planifiée après la réalisation des mesures). Mais si les précurseurs sont inconnus (p. ex. anomalies observées lors des bioessais), les analyses doivent être à nouveau effectuées après la mise en œuvre des mesures à la source. Idéalement, les eaux usées pourront alors être considérées comme non problématiques. Mais si les mesures prises sont trop peu efficaces, les eaux usées ne peuvent être classées clairement. Une décision définitive en faveur de l'ozonation ne peut alors pas être soutenue. Dans ce cas, il convient d'opter pour un procédé alternatif basé sur le charbon actif.

Il convient de noter qu'en cas de combinaison de procédés (ozone avec charbon actif), les aspects critiques d'un traitement à l'ozone individuel ne sont pas automatiquement éliminés: les sous-produits d'oxydation formés par l'ozonation ne sont pas forcément éliminés lors du traitement au charbon actif situé en aval. Mieux vaut chercher à analyser au préalable les conditions limites pertinentes en cas de procédés combinés et à les intégrer dans la planification ainsi que dans l'exploitation. Les vérifications de l'adéquation du procédé d'ozonation en font également partie.

Pour les eaux usées dont l'adéquation à l'ozonation est incertaine, mais pour lesquelles l'ozonation est requise conformément à l'annexe 2 de l'OEaux, il convient dans tous les cas de démontrer qu'aucun produit de réaction problématique ne se forme avec les différents états d'exploitation de la STEP. À cette fin, des modes d'exploitation adaptés ou des combinaisons de différents procédés peuvent être mis en œuvre.

9 ANALYSES COMPLÉMENTAIRES

Pour les eaux appropriées, les vérifications supplémentaires suivantes sont recommandées; la liste ci-après n'est pas exhaustive:

- **Formation de bromate avec différentes doses d'ozone spécifiques:** il est connu que la formation de bromate augmente de manière significative à partir d'une dose d'ozone spécifique d'env. 0.4 mg O₃/mg COD (Soltermann et al., 2016a; 2016b). La dose d'ozone nécessaire pour traiter des eaux usées est généralement de l'ordre de 0.4 à 0.7 mg O₃/mg COD (dans le cas d'ozonations partielles environ 0.2 mg O₃/mg COD). Il est donc recommandé de déterminer la formation de bromate pour la fourchette optimale de doses d'ozone (p. ex. avec 6 doses d'ozone spécifiques différentes).
- **Effets du pH:** le pH a une influence essentielle sur la stabilité de l'ozone, car l'ozone se décompose plus rapidement à un pH élevé. Le pH doit donc être pris en considération pour le dimensionnement. Des informations pour le dimensionnement peuvent être obtenues à l'aide des expériences d'exposition à l'ozone (voir le chapitre «Analyses en laboratoire») avec différents pH (p. ex. pH 7.5 et 8). Par ailleurs, la valeur du pH doit être déterminée lors de l'échantillonnage effectué dans la STEP. Comme la valeur du pH fluctue lors du transport des échantillons et la préparation des échantillons, elle doit être de nouveau réajustée au niveau initial avant l'exécution des analyses.
- **Efficacité de l'élimination des substances de référence:** à l'aide des substances utilisées pour contrôler le taux d'épuration, l'exploitation de l'ozonation et des autres procédés visant à éliminer les micropolluants est contrôlée à intervalles réguliers par les autorités. Un taux d'épuration de 80% doit être obtenu par rapport aux eaux polluées brutes (OEaux RS 814.20 Annexe 3.1 chiffre 2 numéro 8; Ordonnance du DETEC concernant la vérification du taux d'épuration atteint avec les mesures prises pour éliminer les composés traces organiques dans les installations d'épuration des eaux). Des expériences menées en laboratoire permettent de déterminer la plage de la dose d'ozone spécifique optimale permettant d'atteindre le taux d'épuration requis (cela peut également être effectué dans le cadre des «analyses en laboratoire»).

Un projet pilote sur site est relativement fastidieux et onéreux, notamment lorsque les analyses sont accompagnées de bioessais (voir p.ex. Fux et al., 2015). Si les résultats susmentionnés présentent une image indéterminée, il convient de se demander si ces imprécisions pourront être levées dans le cadre d'un projet pilote complet. Un essai pilote n'est donc pas considéré comme faisant partie intégrante des vérifications relatives à l'adéquation du processus d'ozonation.

Pour des eaux usées convenant à une ozonation, un projet pilote réalisé à des fins d'optimisation de l'exploitation peut être pertinent. Toutefois, un tel projet pilote réalisé à des fins d'optimisation de l'exploitation n'est pas indemnisé comme faisant partie des coûts d'investissement.

10 SURVEILLANCE DE LA COMPOSITION DES EAUX USÉES POUR LES STEP AVEC OZONATION

Des concepts de surveillance appropriés doivent être appliqués et des mesures nécessaires doivent être prises, afin de garantir la bonne exploitation de l'installation après la réalisation d'une ozonation (c'est-à-dire une amélioration à long terme de la qualité des eaux usées par l'ozonation). Les anomalies doivent être détectées en temps voulu à l'aide de paramètres de surveillance appropriés. **À cette fin, la plateforme VSA "Techniques de traitement des micropolluants" a élaboré la recommandation du VSA "Exploitation d'une ozonation dans une STEP : reconnaître des développements critiques dans le bassin versant" (2021, adaptée en 2026).**

11 COLLECTE CENTRALISÉE ET STOCKAGE DES DONNÉES

Une fois les analyses effectuées, les données sont mises à disposition de la plateforme « Techniques de traitement des micropolluants » sous forme anonyme. L'enregistrement des données permettant de déterminer les domaines de référence peut ainsi être étendu en continu.

12 RENSEIGNEMENT EN CAS DE QUESTIONS ET DE DOUTES

En cas de questions ou d'incertitudes sur les vérifications à effectuer ou en cas de difficultés rencontrées lors de l'interprétation des données, vous pouvez contacter la plateforme VSA «Techniques de traitement des micropolluants».

13 ANNEXE 1 – SOURCES DE BROMURE

Source	Processus	Variabilité de la concentration	Remarques
Sources importantes de bromure			
Usines d'incinération des ordures ménagères	Brome provenant des ordures ménagères (notamment des agents ignifuges présents dans le plastique) introduit sous forme de bromure dans les eaux usées du système de lavage des fumées par voie humide ainsi que dans les cendres volantes et les mâchefers.	Charge continue, les eaux usées sont parfois déversées de manière discontinue.	Les eaux usées provenant des UIOM sont parfois directement acheminées dans le milieu récepteur après le traitement. Le bromure provenant des UIOM parvient également dans le milieu récepteur via les mâchefers issus de la précipitation des métaux lourds traités dans l'industrie des déchets spéciaux ou via les cendres volantes et les mâchefers issus des décharges.
Décharges de matières solides et bioactives	Le bromure provenant des cendres volantes et des mâchefers issus des UIOM ou des déchets de l'industrie chimique est lixivé.	Charge accrue en cas d'événements pluvieux	
Industrie chimique	Le brome est un groupe partant fréquent lors de la synthèse. Il est également utilisé pour la production de produits bromés; les produits chimiques utilisés pour la neutralisation (p. ex. acides sulfuriques) peuvent être fortement contaminés par le brome.	Très grande variabilité à court et long terme, selon la charge du produit	
Industrie des déchets spéciaux	Incinérateurs de déchets spéciaux avec système d'épuration des fumées par voie humide (combustion de matières plastiques, solvants halogénés, etc.) et traitement chimique par voie humide de mâchefers et de liquides contenant du brome.	Très grande variabilité à court et long terme, selon la charge du produit	
Précipitation	Bromure provenant des aérosols marins.	Selon les précipitations	En Suisse, la concentration de bromure dans les précipitations est plus faible comparé aux régions côtières, avec ~1-5 µg l ⁻¹ .
Sources de bromure moyennes			
Industrie du papier, de l'acier et agroalimentaire	Désinfection de circuits de refroidissement semi-ouverts ou processus de production avec biocides contenant du bromure (bromure comme groupe partant).	Charge continue, les eaux usées sont rarement déversées de manière discontinue.	Des biocides à base de brome sont souvent utilisés.
Sources de bromure mineures			
Piscines de plein air et couvertes	Des produits désinfectants bromés sont rarement utilisés. Dans de très rares cas, de l'acide hypobromeux est produit à l'aide de l'oxydation de NaBr.	La charge continue est faible (échange d'eau). En cas de révisions de bassin, la charge peut augmenter temporairement.	Des produits désinfectants bromés sont principalement utilisés dans les piscines privées.
Bains thermaux	Présentent souvent une faible teneur en bromure.	La charge continue est faible (échange d'eau). En cas de révisions de bassin, la charge peut augmenter temporairement.	
Excréments humains	La charge de bromure est estimée à 7-8 mg d ⁻¹ habitants ⁻¹	Charge continue	
Sources de bromure non pertinentes			
Produits de consommation (cosmétiques, shampoings, agents de lavage, etc.)	Certains produits contiennent parfois des additifs bromés (conservateurs, biocides), qui peuvent émettre du bromure.	Charge continue	
Sel de voirie et sel industriel	Utilisation de sel dans l'industrie ou de sel pour déneiger les routes.	Selon l'utilisation du sel	La part de bromure dans le sel suisse est très faible (10-15 mg _{bromure} /kg _{sel} , Salines Suisses du Rhin).
Agriculture	Certains pesticides bromés sont parfois utilisés comme engrais. C'est également le cas NaBr ou KBr, mais plus rarement.	Charge saisonnière	Parvient rarement dans les STEP.
Cimenteries	Brûlent des combustibles alternatifs (ordures ménagères, et parfois aussi des déchets spéciaux), toutefois sans système d'épuration des fumées par voie humide, c'est pourquoi aucune eau usée contenant du bromure n'est générée.		Dans le futur, les cimenteries pourront potentiellement être équipées de systèmes d'épuration des fumées par voie humide.
Sources potentielles, non pertinentes en Suisse			
Agriculture	Utilisation de bromure de méthyle (pesticide).	Charge saisonnière.	N'est plus autorisé en Suisse.
Industrie du forage des secteurs pétrolier et gazier	CaBr ₂ , NaBr et ZnBr ₂ sont utilisés comme additifs en cas de forage.	Selon l'exploitation, en continu ou de manière discontinue.	Pour le moment, probablement non pertinent pour la Suisse.
Industrie photographique	Le bromure est utilisé pour les pellicules et le papier argenté.		L'importance de cette source a fortement diminué et n'est plus actuelle pour la Suisse.

Tableau A1. Aperçu des sources potentielles de bromure (Soltermann et al., 2016b, adapté).

14 ANNEXE 2 – RÉSUMÉ DES DIFFÉRENTS MODULES

1 Etude du bassin versant

Etude **approfondie** du bassin versant

2 Mesures à l'entrée de l'ozonation planifiée

Concentrations de précurseurs problématiques en entrée de l'ozonation

Bromure: Échantillons composites sur 5 jours (en variant le 1er jour) sur une période de 3 à 6 mois (4 échantillons par mois), ainsi que quelques échantillons composites journaliers

Bromate : quelques mesures, indication des activités artisanales et industrielles

Nitrosamines: une analyse par mois sur 3 à 6 mois

Chrome: quelques analyses, **uniquement en cas d'indications dans le module 1**

Eaux usées communales sans rejets problématiques:
- Bromures < 100 µg/L
- Nitrosamines (total) < 50 ng/L

Eaux usées communales avec petits rejets:
- Bromures: 100-400 µg/L
- Nitrosamines (total) > 50 ng/L

Eaux usées communales avec importants déverseurs:
- Bromures > 400 µg/L

3 Analyses en laboratoire (dose supplémentaire à 0.2 gO₃/gCOD)

(A) Effets de la matrice sur la stabilité O₃

(B) Effets de la matrice sur la stabilité des radicaux OH

(C) Efficacité de l'élimination des composés traces (p. ex. atrazine)

(D) Sous-produits d'oxydation: formation de bromate

(E) Sous-produits d'oxydation: formation de NDMA

- Exposition O₃ et OH[•] dans ou au-dessus de la plage de référence ET
- Composés traces très bien éliminés ET
- Formation de bromates < 5 µg/L à 0.5 gO₃/gDOC ET
- Formation de nitrosamines (total) < 50 ng/L

- Exposition O₃ et OH[•] au-dessus de la plage de référence OU
- Élimination moyenne des composés traces OU
- Formation de bromates > 5 µg/L à 0.5 gO₃/gDOC OU
- Formation de nitrosamines (total) > 50 ng/L

- Exposition O₃ et OH[•] en-dessous de la plage de référence OU
- Mauvaise élimination des composés traces OU
- Formation de nitrosamines (total) > 100 ng/L

4 Bioessais (à 0.5 gO₃/gDOC)

- Test de fluctuation d'Ames

- Test de reproduction avec des daphnies (*Ceriodaphnia dubia*)

- Test combiné avec des algues vertes

Le traitement à l'ozone entraîne une amélioration

Le traitement à l'ozone entraîne parfois une amélioration, parfois une détérioration.

Le traitement à l'ozone entraîne une détérioration

Eau usée adéquate

Eau usée indéterminée

Eau usée inadéquate

15 BIBLIOGRAPHIE

- Abegglen, C. et Siegrist, H. (2012). Micropolluants dans les eaux usées urbaines. Etape de traitement supplémentaire dans les stations d'épuration. Office fédéral de l'environnement, Berne. Connaissance de l'environnement. N° 1214: 210 p.
- CDPH (2009): NDMA and Other Nitrosamines – Drinking Water Issues. Department of Public Health. www.cdph.ca.gov
- Dominguez, D., Diggelmann, V., Binggeli, S. (2016). Elimination des composés traces organiques dans les eaux usées. Financement des mesures. Office fédéral de l'environnement, Berne. L'environnement pratique, n° 1618: 34 p.
- Envilab (2026). *Abklärungen Verfahrenseignung Ozonung: Arbeitsanweisung zur Durchführung der Abklärungen. Version 3.* Zofingen, Schweiz.
- Envilab (2024a). *ARA mit Ozonung: Bestimmung der Mutagenität mittels Ames-Test. Studie im Auftrag des VSA.*
- Envilab (2024b). *Beurteilung der Nitrifikation im Labor bei den Abklärungen Verfahrenseignung Ozonung. Studie im Auftrag des VSA.*
- DFI (2017): *Département fédéral de l'intérieur DFI Ordonnance du DFI sur l'eau potable et l'eau des installations de baignade et de douche accessibles au public du 1^{er} mai 2017 (version du 1^{er} juillet 2017).* Berne, Suisse.
- LEaux: Loi fédérale sur la protection des eaux (Loi sur la protection des eaux), 814.20, du 24 janvier 1991 (état au 1^{er} janvier 2016).
- OEaux: Ordonnance de protection des eaux, 814.201, du 28 octobre 1998 (état au 1^{er} janvier 2016).
- Envilab (2020). *Abklärungen Verfahrenseignung Ozonung: Arbeitsanweisung zur Durchführung der Abklärungen. Version 2.* Zofingen, Schweiz.
- Fux, C., Kienle, C., Joss, A., Wittmer, A., Frei, R. (2015). Ausbau der ARA Basel mit 4. Reinigungsstufe – Pilotstudie: Elimination Mikroverunreinigungen und Ökotoxikologische Wirkungen. *Aqua & Gas*, n° 7/8, p. 10-17.
- Grelot, J., Wunderlin, P., Bleny, H. (2020). *Abklärungen Verfahrenseignung Ozonung - Erkenntnisse aus mehrjährigen Erfahrungen.* *Aqua & Gas*, Nr. 10, S. 48-57.
- Katsoyiannis, I.A., Gachet, C., von Gunten, U. (2018). Fate of Cr(III) during ozonation of secondary municipal wastewater effluent. *Ozone: Science & Engineering*, 40:6, 441-447, DOI: 10.1080/01919512.2018.1481362
- Kienle, C., Kase, R., Schärer, M., Werner, I. (2015). Ökotoxikologische Biotests – Anwendung von Biotests zur Evaluation der Wirkung und Elimination von Mikroverunreinigungen. *Aqua & Gas*, n° 7/8, p. 18-26.
- Krauss, M., Longrée, P., Dorusch, F., Ort, C., Hollender, J. (2009). Occurrence and removal of *N*-nitrosamines in wastewater treatment plants. *Water Research*, 43: 4381-4391.
- Langer, M. und Kienle, C. (2016). Effektmessung: Ökotoxikologische Biotests zur Beurteilung der Abwasserbehandlung. 79./80. Cours de perfectionnement VSA: Micropolluants, Emmetten.
- Lee, Y. et al. (2013): *Prediction of micropollutant elimination during ozonation of municipal waste-water effluents: Use of kinetic and water specific information.* *Environmental Science & Technology* 47: 5872–5881.
- Lee, Y., von Gunten U. (2016). Advances in predicting organic contaminant abatement during ozonation of municipal wastewater effluent: reaction kinetics, transformation products, and changes of biological effects. *Environmental Science: Water Research and Technology*, 2, 421-442.
- Manasfi, T., Diezinger, Ch., Rath, S., Minakata, D., von Gunten U. (soumis). *Nitrite oxidation during ozonation revisited: Mechanisms of nitration reactions.* *Environmental Science Technology*.
- Centre écotox (2015). Environmental Quality Standard (EQS) - Proposition du centre écotox pour le bromate. http://www.oekotoxzentrum.ch/media/90565/bromat_dossier_final.pdf
- Piazzoli, A., Grelot, J., Wunderlin, P., von Gunten, U. (2022). *Beurteilung Repräsentativität Abklärungen Verfahrenseignung Ozonung. Studie im Auftrag des Bundesamts für Umwelt (BAFU).* Dübendorf und Zofingen.
- Schindler Wildhaber, Y., Mestankova, H., Schärer, M., Schirmer, K., Salhi, E., von Gunten, U. (2015): Novel test procedure to evaluate the treatability of wastewater with ozone. *Water Research* 75, 324–335.
- Sgroi, M., Roccaro, P., Oelker, G.L., Snyder, S.A. (2014). *N*-nitrosodimethylamine formation upon ozonation and identification of precursors source in a municipal wastewater treatment plant. *Environmental Science and Technology*, 48: 10308-10315.

- Soltermann, F., Abegglen, Ch., Götz, Ch., von Gunten U. (2016a). Bromide sources and loads in Swiss surface waters and their relevance for bromate formation during wastewater ozonation. *Environmental Science and Technology*, 50: 9825-9834.
- Soltermann, F., Abegglen, Ch., Götz, Ch., Zimmermann-Steffens, S., von Gunten, U. (2016b). Bromid im Abwasser: Bromatbildung bei der Ozonung – Einschätzung der zukünftigen Situation. *Aqua & Gas*, n° 10, p. 64-71.
- Soltermann, F., C. Abegglen, M. Tschui, S. Stahel and U. von Gunten (2017). Options and limitations for bromate control during ozonation of wastewater. *Water Research* 116: 76-85.
- Ordonnance du DETEC visant à contrôler l'efficacité des mesures d'élimination des composés traces organiques dans les installations d'épuration des eaux usées, 814.201.231, du 3 novembre 2016, (état au 1^{er} décembre 2016).
- OMS (2008): Guidelines for Drinking–Water Quality, 3rd edition including 1st and 2nd addenda.
- VSA (2021, adaptée en 2026). Recommandation «Exploitation d'une ozonation dans une STEP : reconnaître des développements critiques dans le bassin versant ». www.micropoll.ch
- Wunderlin, P., Mestankova, H., Salhi, E., Schindler-Wildhaber, Y., Schärer, M., Schrimmer, K., von Gunten, U. (2015). Méthode d'essai pour l'évaluation de la traitabilité des eaux usées à l'ozone *Aqua & Gas*, n° 7/8, p. 25-38.
- Wunderlin, P., Piazzoli, A., Bitterwolf, S. (2026). Abklärungen Verfahrenseignung Ozonung –Entscheidungsgrundlage verbessert. *Aqua & Gas*, Nr. 3, S. 72-80.
- Zappatini, A. et Götz, C. (2015). Testverfahren zur Beurteilung der Behandelbarkeit von Abwasser mit Ozon – Anleitung zur Durchführung der Laborversuche. Envilab, à la demande du VSA. Zofingen, septembre 2015.